

— UNIVERSITÉ DE LA RÉUNION —

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du titre de
Docteur de l'Université de La Réunion

École doctorale : Sciences, Technologies et Santé
Formation doctorale : Chimie
Section C.N.U : 31 (Chimie théorique, physique, analytique)

**Rôle des constituants chimiques du café vert, du terroir et des traitements
post-récolte sur la qualité aromatique du « Bourbon Pointu »**

Par

Sébastien PICCINO

Soutenance prévue le 27 octobre 2011 devant le jury composé de :

Mme	Andrée VOILLEY	Professeur, AgroSup Dijon	Rapporteur
Mme	Sabine GALINDO	Professeur, Université Montpellier II	Rapporteur
Mme	Jacqueline SMADJA	Professeur, Université de La Réunion	Examineur
M.	Renaud BOULANGER	Chargé de recherche, CIRAD Montpellier	Co-directeur de thèse
M.	Alain SHUM CHEONG SING	Maître de Conférences, HDR, Université de La Réunion	Directeur de thèse
M.	Frédéric DESCROIX	Coordinateur du programme de recherche sur le « Bourbon Pointu », CIRAD Réunion	Invité

Remerciements « ad vitam aeternam »

Remercier une personne, c'est la faire entrer dans votre vie pour un instant ou pour qu'elle soit le « synonyme » d'un de vos souvenirs, son adjectif, son verbe, sa formule magique pour toute votre vie. C'est dans cette conjugaison pascalienne du souvenir que je voudrais adresser mes remerciements à ces personnes qui ont toutes traversé ma vie. Rassurez vous, je n'énumérerai que les personnes qui répondront par leur nom à un discours de remerciements « politiquement correct » de manuscrit de thèse.

Mon premier « Merci » revient à Monsieur Shum Cheong Sing qui de part la sensibilité de son cœur a su raviver en moi la flamme de l'envie d'être curieux dans des moments où l'apprenti chercheur aurait voulu se tourner vers la facilité de la damnée oisiveté.

MERCI en majuscule pour que les lettres comme le souvenir de vous, aussi lourds qu'ils soient, ne s'envolent jamais.

Madame Smadja, une élégance au service de l'intelligence, une femme au profil de présidente mais que sa peur de décevoir, cela n'engage que moi, m'a permis de la rencontrer. Merci et j'aurai bien aimé pouvoir féminiser ce mot pour vous l'attribuer tant il vous est dû.

Renaud, Frédéric, tant de fois nos esprits se sont échauffés, tant de fois je me suis écarté de la piste sur laquelle nous courions tous les trois vers le même but ; bien entendu, un parmi tant d'autres pour vous mais pour moi le seul. Et vous m'avez transmis le relais du courage et de l'abnégation dans le virage de ma vie professionnelle. Merci à vous

Un grand « Merci » à Mesdames Voilley et Galindo pour avoir accepté de faire partie de mon aventure. Madame Voilley, au souvenir de vos mots complimenteurs au sujet du nombre d'analyses réalisées lors du premier comité de thèse, j'espère que ce manuscrit et plus tard la soutenance ne vous décevront pas. Madame Galindo, je suis ravi que vous consacriez un peu de votre temps aussi occupé soit-il, à apporter à ce manuscrit votre regard d'experte sur le café.

Merci à vous, les autres « profs » du LCSNSA (même en l'écrivant doucement et au clavier, j'oublie encore le deuxième « s »). Vous, pour certains, qui m'avez enseigné ce qui m'a permis d'être là, au seuil d'une victoire professionnelle, pour d'autres, qui avez réussi à soulager des journées où le poids du stress d'une thèse peut vous briser. Merci

Clara, Marie, Sabrina, Sophie, William (ordre alphabétique), que dire... et si seulement nous nous étions retrouvés sur une île déserte sans contraintes « vitales » pour

chacun, nous aurions pu partager plus que les mots qui ont maquillé nos sentiments d'amitié naissante. Je vous connais un peu mais surtout à la hauteur de votre empreinte sur des cahiers de laboratoire. Mais Merci à vous d'avoir stimulé ou simulé une émulation entre apprentis chercheurs.

Succinctement, je voudrais adresser mes plus sincères remerciements à cette femme qui à la fois m'a envoyé nu aux enfers et à la fois m'a revêtu d'un manteau de joie. Elle se reconnaîtra si elle lit ce manuscrit un jour.

Merci à toi Marika, tu es entrée dans ma vie comme un ange et par ta douceur d'être et de vivre, tu m'as fait découvrir l'autre face de la pièce, la plus belle et inconnue de moi, celle dont je pensais qu'elle n'existait pas, jusqu'à ce jour. J'aime être à tes côtés et j'oublie avec toi que la vie est si courte. J'aime ta personne, le naturel et l'intégrité de notre amour. Merci et doux baisers intimes.

A ma famille, à Alexandre, à Eric pour la vie, aux trois femmes qui ont partagé ma vie durant ces cinq années.

Papa, Maman, j'aurai le jour de l'attribution de mon titre de « Docteur » (Si bien sur, je réussis ce dernier examen de l'enseignement supérieur) un sentiment de réussite personnel différent à l'égard de chacun mais qui répondra à vos attentes de moi.

Papa, je serai fier de te montrer que malgré mes 18/20 au lycée, je n'avais pas de poil dans la main ! Que ton éducation stricte au sens le plus profond du terme démasquée par ton amour si réservé pour moi, ne se dévoilant qu'avec les autres, tes valeurs d'éthique qui sont les miennes maintenant, m'ont permis de réussir en prenant des coups et sans me relâcher, toujours à penser à l'avenir.

Maman, hummm.... ! Un vrai bijou, un sourire et un rire qui vous obligent à la suivre. Et bien oui ! Je t'ai suivie un soir de l'année...Pas toujours aisé de te comprendre ni à te calmer dans tes impasses. Mais je pense que lorsqu'un enfant dit à sa mère : « Tu es la plus belle et la plus gentille des mamans de la Terre », il est sincère et comme lui, je crois vraiment que ma maman est la meilleure et qu'elle est éternelle.

Enfin, à toi, la dernière mais « le meilleur pour la fin », une phrase si triviale mais tellement vraie, en tout cas pour moi. Attention je vais parler avec notre code: « Marie, ma sœur chérie, tu es la number one de mon cœur » Notre histoire est si aventureuse de périples, longtemps séparés, réunis un moment, embrassant l'incroyable éternité et aujourd'hui distants, pliés sous la réalité de nos vies d'adulte. Je n'ai pas grand-chose à te dire de plus qui pourrait te surprendre, tu finirais ma phrase ou nous dirions le même mot au même moment,

comme à notre habitude. Tu me connais et je te connais comme si nous formions qu'un seul être. Et c'est à toi, rien qu'à toi que je dirai « Je t'aime », et même deux fois
Tu es plus que ma vie, Marie, Je t'aime

A un petit bout de vie

Tu sais, tu la connais cette envie de cueillir cette fleur
Mais tu hésites car elle est seule et si tu l'arrachais même sans heurts,
Tu repousserais toute résignation à ce dogme manichéen du bien et du mal.
Car, connais-tu vraiment celui qui te jugera au son du glas.
Alors, franchement prends la, retourne toi et que tes yeux se ferment,
Oublie ta ceinture terrestre et pense à cette aventure qu'est l'éphémère.
Je t'avoue, je la connais cette envie, je m'y suis laissé tenter et j'ai abdiqué.
Personne ne saura à quel point j'aurai voulu que cette fleur soit toi en vérité.

A toi, pour toi, à jamais toi
Gaïa que ton prénom de joie
Pense à moi, à elle, pardonne nous
C'est toi qui devrais respirer dans cette vie
C'est toi qui devrais rire de la vie
Tu seras toujours en nous, ma fille

Sommaire

Liste des abréviations	9
Introduction générale	10
Chapitre I – Généralités sur le café	14
Introduction	15
1 - Présentation du caféier et de son fruit	15
2 - Les cafés commerciaux	16
2.1. Distinction entre les variétés <i>arabica</i> et <i>robusta</i>	16
2.2. La production mondiale	17
2.3. La création de nouvelles niches commerciales	18
2.3.1. Définition de la qualité	19
2.3.2. La qualité dans la filière caféicole	20
2.3.2.1. <i>Le cahier des charges en vue de la création des cafés labellisés</i>	20
2.3.2.2. <i>Le « specialty coffee » (Café gourmet)</i>	22
3 - Le café à La Réunion	26
3.1. Historique	26
3.2. Le « Bourbon Pointu »	28
3.2.1. Description botanique	28
3.2.2. Le choix des parcelles	30
3.2.3. Traitement du « Bourbon Pointu » après récolte	32
Conclusion	34
Références bibliographiques	35
 Chapitre II – Composition chimique du café « Bourbon Pointu » suivi de son évolution	 37
Introduction	38
1 - Etude du café vert	39
1.1. Distinctions de l'origine botanique et géographique des cafés	39
1.2. Composition chimique globale du « Bourbon Pointu »	41
1.3. Evolution de la composition chimique	45
1.3.1. Composition par année de récolte	45
1.3.2. Influence des paramètres pédoclimatiques entre les deux années de récolte	47
1.3.2.1. <i>Au niveau de la zone de l'île entre les deux années</i>	47
1.3.2.2. <i>Au niveau de la classe d'altitude entre les deux années</i>	49
1.3.2.3. <i>Au niveau du type de transformation post-récolte entre les deux années</i>	51
1.3.3. Le paramètre pédoclimatique prépondérant	54
2 - Etude du café torréfié	58
2.1. La torréfaction	58

2.1.1. Le profil de torréfaction	60
2.1.1.1. Mise en œuvre du profil de torréfaction du café « Bourbon Pointu »	60
2.1.1.2. Analyse de la qualité gustative des cafés obtenus en fonction du profil de torréfaction	62
2.2. La composition volatile du café torréfié	66
2.2.1. Fraction aromatique du café « Bourbon Pointu » torréfié en poudre	66
2.2.1.1. Méthodologie utilisée	66
2.2.1.2. Composition aromatique du café torréfié en poudre	67
2.2.1.3. Evolution de la composition aromatique	71
2.2.1.3.1. Comparaison entre deux années 2006 et 2007	71
2.2.1.3.2. Recherche du facteur le plus influent dans l'évolution de la composition aromatique	74
2.2.1.3.3. Mise en évidence de distinctions plus fines au niveau du traitement post-récolte	77
2.2.2. Fraction aromatique du café boisson	80
2.2.2.1. Méthodologie utilisée	80
2.2.2.2. Composition aromatique du café boisson	81
2.2.2.2.1. Etude de la variation de la composition	86
2.2.2.2.2. Recherche des molécules caractérisant les divers traitements post-récolte	89
Conclusion	93
Références bibliographiques	95
 Chapitre III – Caractérisation des catégories commerciales du café « Bourbon Pointu »	 102
Introduction	103
1 - La segmentation commerciale et qualitative du « Bourbon Pointu »	104
1.1. Critères de classification	105
1.2. Catégorisation des échantillons des campagnes de récolte 2006 et 2007	105
1.2.1. Analyse sensorielle des cafés boissons issus des échantillons torréfiés	105
1.2.2. Répartition des échantillons dans les différentes catégories	107
2 - Corrélation entre la composition des cafés verts et les différentes catégories	109
2.1. Caractérisation biochimique des différentes catégories	109
2.2. Discrimination des quatre catégories en fonction des composés biochimiques retenus	112
2.3. Corrélation entre les trois catégories commerciales et les composés biochimiques du café vert	114
3 - Corrélation entre la composition aromatique des cafés boissons et les différentes catégories	121
3.1. Composé volatil et impact olfactif	121
3.2. Caractérisation aromatique des cafés boissons par catégorie commerciale	123
3.2.1. Composés communs aux trois catégories commerciales	130
3.2.2. Composés odorants propres à chaque catégorie commerciale	132
4 - Corrélation entre la composition du café vert, la composition aromatique des cafés boissons et les différentes catégories	135

4.1. Les différents mécanismes de génération d'arômes	135
4.2. Critères de différenciation entre les trois catégories commerciales	141
4.3. Génération des composés aromatiques typiques de chaque catégorie commerciale	145
Conclusion	156
Références bibliographiques	158
Conclusion Générale	163
Partie expérimentale	167
Références bibliographiques	185
Liste des tableaux	186
Liste des figures	189
Résumé	191

Liste des abréviations

ACP : Analyse en Composantes Principales

Acides gras :

(C16:0) : Acide palmitique

(C18:0) : Acide stéarique

(C20:0) : Acide arachidique

(C18:1 n-9) : Acide oléique

(C18:2 cc) : Acide linoléique

(C18:3 n-3) : Acide α -linolénique

AFD : Analyse Factorielle Discriminante

ANOVA : ANalysis Of VAriance

Arabica : *Coffea arabica* var. *arabica*

Au : Cafés classés dans la catégorie commerciale dite «Authentique »

Gr : Cafés classés dans la catégorie commerciale dite « Grand cru »

I.R.R : Indice de Rétention Relatif

Isomères de l'acide chlorogénique :

(3-CQA) : Acide caféoyl-3-quinique

(4-CQA) : Acide caféoyl-4-quinique

(5-CQA) : Acide caféoyl-5-quinique

(3,4-diCQA) : Acide dicaféoyl-3,4-quinique

(3,5-diCQA) : Acide dicaféoyl-3,5-quinique

(4,5-diCQA) : Acide dicaféoyl-4,5-quinique

(5-FQA) : Acide féruloyl-5-quinique

ns : non significatif au seuil de risque 5%

Robusta : *Coffea canephora* var. *robusta*

OAV : Odor Activity Value

s : significatif au seuil de risque 5%

Σ acides chloro. /glu : rapport entre la teneur des acides chlorogéniques et celle du glucose

Σ acides gras. /glu : rapport entre la teneur des acides gras et celle du glucose

SPE : Solid Phase Extraction

SPME : Solid Phase Micro Extraction

Su : Cafés classés dans la catégorie commerciale dite « Sublime »

vs : comparé à

V-test : valeur test

eV : électron volt

MJ : méga joules

MS : matière sèche

% MS : pourcentage pour 100 grammes de matière sèche

M Ω .cm : mégaohm pour un centimètre

mm/mois : millimètre d'eau dans un mètre carré pendant un mois

μ S/cm : microSiemens pour un centimètre

ppm : partie par million

u.m.a : unité de masse atomique

Introduction Générale

L'existence de la première utilisation des grains de café aurait-elle été décrite dans certains textes de l'Ancien Testament dans le passage de (Samuel 17/28) : « Il y avait du froment, de l'orge, la farine et du grain grillé » ? Seul l'auteur de cette phrase détient pour toujours la véritable signification du grain grillé.

Cependant, ce sont les pionniers Razès et Avicenne, respectivement aux IX^{ème} et XI^{ème} siècle qui rapportèrent les premières mentions écrites sur le café. Cette boisson reste relativement confinée à l'Arabie et, après la Perse, la Syrie, la Turquie, le public découvre cette nouvelle saveur en 1554 à Constantinople, en 1625 à Venise et en 1640, ce nectar arrive à Marseille.

Concernant l'île Bourbon, située sur la route des Indes Orientales et habitée depuis 1665, le roi de France lui envisage une destinée autre qu'une simple escale : l'île doit être un réservoir à café pour les amateurs européens ! Ordre est donc donné dès 1714 aux navires de ramener de Moka en Arabie des plants de café. L'île s'avère un terroir fertile suite à l'introduction de plusieurs variétés d'Arabica. De plus, un café endémique, *Coffea Mauritiana Lamarck* s'y trouve. Le café est ainsi la première monoculture que connaît l'île qui est alors transformée en une terre de plantations. Le XVIII^{ème} siècle verra le développement de la culture du *Coffea arabica* var *Bourbon* dont l'exploitation dure environ un siècle avant d'être supplantée peu à peu par la canne à sucre à partir des années 1810. Le remplacement des vergers du café Bourbon rond par la canne et la préoccupation des producteurs de ne pas mettre tous les œufs dans le même panier favorisa, à partir de 1830, la création plus en altitude de vergers avec le caféier Bourbon Pointu découvert en 1771, caféier qui supporte mieux les fraîcheurs des hauts que la variété Bourbon. Ainsi en 1880 le verger caféier réunionnais atteignait 6000 hectares soit environ les superficies de la fin du XVIII^{ème}. De cette époque, sont restés le souvenir d'un breuvage apprécié des consommateurs et la présence des diverses variétés dont le Bourbon rond (*Coffea arabica* var. *Bourbon*), le Bourbon Pointu (*Coffea arabica* var. *laurina*), le café d'Eden, le café de Myrte dans les jardins créoles, tous provenant de la région de Moka. Le Bourbon rond et le Bourbon Pointu étaient les variétés les plus cultivées. La variété Bourbon Pointu, connue pour sa faible productivité, était cependant de qualité. A ce propos, Philippe Jobin, d'une famille du Havre dédiée au commerce du café depuis le XIX^{ème} siècle, a écrit au sujet de ce café : « *Bourbon Pointu fut l'un des meilleurs cafés du monde* ».

La diversification nécessaire des cultures face à la monoculture de la canne à sucre, l'aménagement des terres agricoles des Hauts de l'île, la recherche de produits à haute valeur

ajoutée partiellement destinée à l'exportation ont suscité un intérêt régional pour une relance de la culture du café au début de ce millénaire. Cependant, le café étant un produit largement cultivé dans les régions tropicales à faible coût de main d'œuvre, seuls des produits présentant des qualités sensorielles remarquables et une typicité non décelée chez les meilleurs cafés mondiaux peuvent espérer être rapidement remarqués sur le marché des "specialty coffee" ou « cafés gourmets » à haute valeur commerciale. Afin d'optimiser ses chances de figurer parmi les grands crus, une espèce oubliée mais toujours appréciée, ayant fait l'objet de peu de travaux scientifiques, non commercialisé depuis soixante ans, à faible teneur en caféine a été choisie en 2002, le *Coffea arabica* var. *laurina*, aussi connue sous différentes appellations : Bourbon Pointu, Laurina, Le roi, café Leroy. L'origine du nom Leroy viendrait du nom du régisseur du domaine sur lequel a été découvert ce caféier mutant.

Dans le but de pouvoir exprimer au maximum les qualités gustatives du café « Bourbon Pointu », les travaux présentés ont pour objectif de rechercher les molécules ou les facteurs de traitement ayant un rôle primordial dans l'élaboration de ce café gourmet.

Trois grandes parties composent ce mémoire :

- ✓ Après une description botanique du caféier et un panorama de l'évolution du marché du café notamment du point de vue de la qualité, la genèse du projet « Bourbon Pointu » est présentée.
- ✓ La deuxième partie du travail concerne l'acquisition de connaissances :
 - d'une part, sur la composition chimique et notamment son évolution selon les traitements post-récolte des grains de café vert ou selon les aspects géoclimatiques. Il est important de vérifier si, quelque soient les traitements et les terroirs, le « Bourbon Pointu » conserve les caractéristiques biochimiques de la famille des Arabicas, cette dernière donnant les cafés gourmets les plus célèbres au monde : *Blue Mountain* de Jamaïque, *Kalossi* des Célèbes, *Tres rios* du Costa Rica, *Antigua* du Guatemala.
 - d'autre part, sur l'influence de différents profils de torréfaction sur la qualité gustative de la boisson et les composés volatils, la forme allongée du « Bourbon Pointu » pouvant conduire à des transferts de chaleur non classiques.

- ✓ La troisième partie est consacrée aux cafés « Bourbon Pointu » classés afin de déterminer les précurseurs d'arômes du café vert et leur corrélation avec les molécules volatiles générées lors de la torréfaction du café et de leur dissolution dans la boisson, certains précurseurs et molécules volatiles pouvant servir de marqueurs spécifiques aux trois catégories de cafés commercialisés : Grand cru, Sublime et Authentique.

Chapitre I

Généralités sur le café



Introduction

Historiquement, le caféier serait originaire de la province éthiopienne de Kaffa d'où aurait germé le mot « café ». Cette boisson appelée « Kahwa » et considérée comme un breuvage tonique s'est répandue dans tout le monde arabe jusqu'à son introduction en Europe dans les années 1600 après Jésus-Christ par les marchands vénitiens et les Turcs. C'est dans la deuxième partie du XVII^{ème} siècle que le café arrive en France. Cultivé des années plus tard dans le jardin des Plantes à Paris, il est ensuite introduit aux Antilles et dans les colonies françaises.

Pour certains, cette boisson est, non seulement, l'œuvre d'une nature corrompue génératrice d'effets secondaires nuisibles à la santé de l'homme, mais aussi complice de certains vices humains telles l'oisiveté ou encore la diffamation. Pour d'autres, le café est l'opium des peuples révélant les facultés d'intelligence et de performances humaines, un véritable élixir source de bonheur.

1 - Présentation du caféier et de son fruit

Du point de vue taxonomique, le caféier appartient à la famille des Rubiacées comportant 500 genres dont le genre *Coffea*. Le genre *Coffea* comprend environ 120 espèces en tenant compte des *coffea* sauvages. Le genre *Coffea* est le plus étudié. Ce classement botanique a été créé par Linné en 1735 et a subi des aménagements successifs. Il divise le genre *Coffea* en quatre groupes parmi lesquels Eucoffea est le plus important. Le groupe Eucoffea est subdivisé en cinq sous-groupes dont le sous-groupe Erythrocoffea auquel appartiennent les espèces *arabica* et *canephora* [1, 2]

Au niveau de sa description botanique, le caféier est une plante pouvant atteindre dix huit mètres de hauteur pour certaines espèces comme *Coffea liberica*. Cependant, dans les plantations, les caféiculteurs la conservent à trois mètres pour qu'elle soit à la hauteur des cueilleurs afin de faciliter son exploitation. Les fleurs blanches et parfumées sont groupées par cymes à l'aisselle des feuilles et forment des verticilles de huit à quinze fleurs en moyenne. Elles ont l'aspect de glomérules floraux. Les feuilles, disposées par deux, sont opposées et demeurent vertes toute l'année. Le caféier possède la particularité de pouvoir porter en même temps, selon les conditions climatiques, la fleur et le fruit. Le fruit du caféier est un fruit rouge ou jaune (Caturra Amarelo et autres variétés) appelé cerise, charnu à noyau. Plusieurs couches entourent deux graines vertes appelées les fèves ou grains de café vert. Les

fruits sont des drupes de forme ovoïde, d'abord verte puis jaune et enfin rouge cramoisi de 1,6 cm à 1,8 cm. Deux loges séparées renferment chacune une graine avec une face plane creusée d'un sillon. La drupe est entourée d'une pellicule rouge lisse, l'exocarpe qui recouvre la pulpe de teinte jaunâtre. La pulpe adhère à une paroi dure et cellulosique, la parche (ou l'endocarpe). L'ensemble forme la coque qui sera éliminée pour recueillir les deux graines. La graine, recouverte d'une pellicule argentée et très mince appelée spermodermes, renferme l'embryon (germe). Les dimensions des graines et leurs formes diffèrent sensiblement en fonction des espèces, des variétés et des conditions de culture [3]. Un schéma d'une coupe de la cerise de café est donné sur la figure 1.

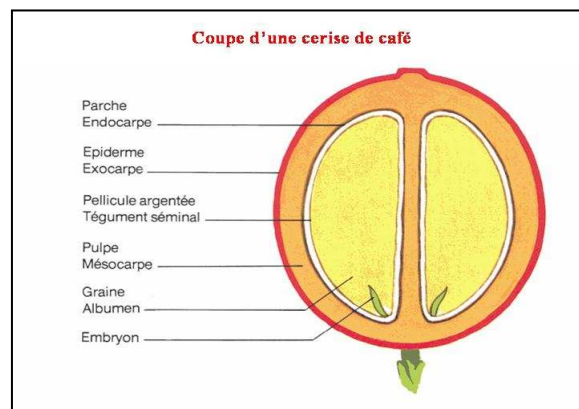


Figure 1 : Représentation des différentes parties en coupe d'une cerise de café.

2 - Les cafés commerciaux

Les espèces *arabica* et *canephora* ainsi que leurs hybrides sont les espèces les plus cultivées. *Coffea arabica* Linné et *Coffea canephora* Pierre comprennent respectivement les variétés regroupées dans les catégories plus communément appelées « *arabica* » et « *robusta* »

2.1. Distinction entre les variétés *arabica* et *robusta*

Cette distinction est à la fois génétique, morphologique, agronomique. La différence génétique au niveau du nombre de chromosomes induit des différences morphologiques entre ces deux espèces. La variété *robusta* donne des graines à la forme plus arrondie, plus petites et plus épaisses que la variété *arabica*. De plus, les lieux de cultures et le type de

transformation post-récolte étant différents pour les deux espèces, cela engendre des différences de composition biochimique du café vert entre les deux variétés. Par conséquent, le génotype, l'environnement géo-climatique et le système de production sont autant de facteurs qui influencent la qualité du café vert et du café torréfié. En effet, en tasse, la variété *arabica* aura un arôme plus subtil et fruité, alors que la variété *robusta* aura un goût corsé et amer. Le tableau I résume les principales différences entre les deux espèces les plus cultivées au monde.

Tableau I
Principales différences entre les variétés *arabica* et *robusta*.

Paramètres	variété <i>arabica</i>	variété <i>robusta</i>
Date de description de l'espèce	1753	1895
Nombre de chromosomes (2n)	44	22
T°C moyenne annuelle optimale	15-24°C	24-30°C
Précipitations optimales	1500-2000 mm	2000-3000 mm
Altitudes optimales	500-2000 m	0-700 m
Type de transformation post-récolte (le plus souvent utilisée)	par voie humide	par voie sèche

2.2. La production mondiale

Coffea arabica et *Coffea canephora* var. *robusta* constituent l'essentiel du marché du café dans le monde dont elles représentent respectivement 65 % et 35 %. *Coffea arabica* comporte deux populations : Bourbon et Typica. Les producteurs principaux sont le Brésil, la Colombie, l'Éthiopie et le Pérou. Le Brésil demeure le plus gros producteur de café Arabica. La variété *robusta* est la plus cultivée pour *Coffea canephora*. Cette dernière est surtout produite au Vietnam qui est le producteur le plus important, en Indonésie, en Côte d'Ivoire et en Ouganda. La figure 2 illustre la répartition mondiale de la production du café, *Coffea arabica* et *Coffea canephora* var. *robusta* confondus. Les valeurs en % sont issues des statistiques commerciales réalisées en 2010 par l'International Coffee Organization.

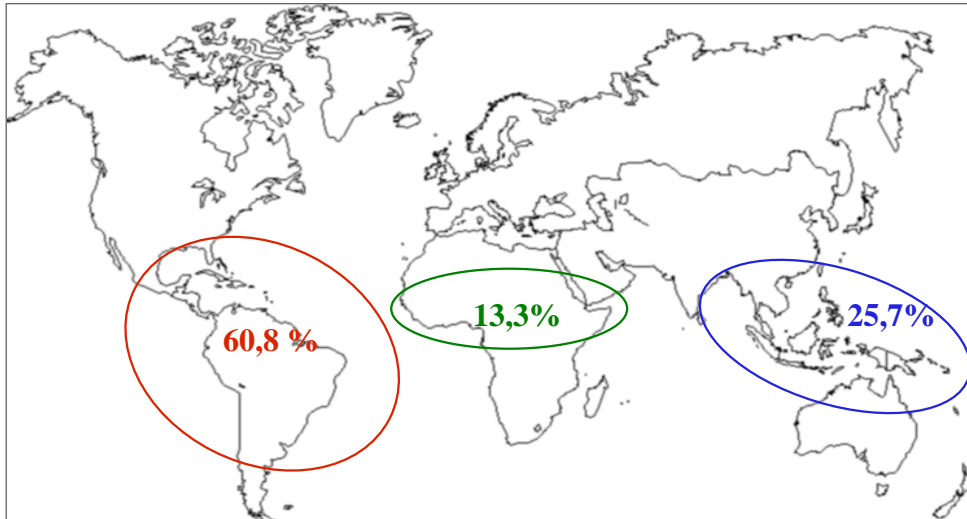


Figure 2 : Répartition mondiale de la production du café.

Au total, cinquante-sept pays tropicaux produisent annuellement aux alentours de cent millions de sacs de soixante kilogrammes de café. Plus de vingt millions d’emplois dépendent de cette culture et près de quatre cent cinquante millions de consommateurs boivent du café chaque jour [4].

Le café est le deuxième produit en valeur financière dans les échanges internationaux, juste après le pétrole, ce marché représente un enjeu économique considérable pour de nombreux pays et les fluctuations boursières dépendantes des volumes de production ont des retentissements importants sur le devenir de la filière et des produits qui en découlent.

2.3. La création de nouvelles niches commerciales

La mondialisation des économies et la compétition accrue qui en découle, incitent les producteurs à se trouver de nouvelles niches commerciales *via* des slogans ou des comportements en meilleure adéquation avec les attentes du consommateur. Ainsi, les interrogations relatives à la qualité des produits ont pris une réelle importance au fil des dernières décennies. Cependant, selon le Comité National d’Alimentation (CNA), la notion de qualité dans le secteur agroalimentaire fait figure « d’attrape-tout ». Il est donc nécessaire en premier lieu d’apporter quelques précisions sur la notion de qualité et ses implications afin de l’adapter ensuite au mieux à la filière café.

2.3.1. Définition de la qualité

Dans sa norme ISO 8402, l'Organisation Internationale de Normalisation définit la qualité comme étant l'ensemble des propriétés et caractéristiques d'un produit, d'un processus ou d'un service qui permet de satisfaire des besoins implicites ou explicites [5]. Cette définition a été perçue par les instances publiques et les acteurs socio-économiques comme relativement large et subjective. Chaque acteur économique a sa propre appréhension de la notion de qualité. Néanmoins, il est admis que :

- La qualité peut s'appliquer à un produit ou à un système (chaîne de production ou de commercialisation, usine, ...),
- Les besoins implicites ou explicites sont la santé, la sécurité, le service, la satisfaction et la régularité.

Pour un produit destiné à l'alimentation, selon P. Creysse, Président honoraire de la Commission Nationale des Labels (CNLC) et de la Certification et de la section agro-alimentaire du Comité Français d'Accréditation (COFRAC), les notions de santé ou de sécurité représentent les besoins implicites alors que la satisfaction liée à la notion de plaisir et le service constituent les besoins explicites. La régularité des réapprovisionnements ou de l'homogénéité des lots est le maillon indispensable pour satisfaire à la fois les besoins implicites et explicites [6]. Selon le Comité National de l'Alimentation (CNA), ces précisions permettent de situer la qualité des produits commercialisés ou en cours d'élaboration à trois niveaux [7] :

- *La qualité générique* : elle repose essentiellement sur la sécurité sanitaire et le niveau nutritionnel. 80% des denrées proposées au consommateur sont des produits génériques. Le niveau minimal requis est fixé par la réglementation instaurée par les pouvoirs publics.
- *La qualité spécifique* : Elle repose sur la valorisation des caractéristiques spécifiques du produit (goût, mode de transformation, terroir...) par rapport aux produits courants. Les produits rencontrés sont reconnaissables à leurs « Signes » officiels de qualité : AOC, label rouge... Les caractéristiques des produits certifiés reposent sur des critères objectifs, mesurables, contrôlables, quantifiables et significatifs consignés dans une norme ou un cahier des charges mis en place par les acteurs de la filière.

- *La qualité sociétale* : ce critère relativement récent répond à de nouvelles attentes d'une partie des consommateurs soucieux de connecter la qualité alimentaire à une approche sociale (respect de l'environnement, respect de la biodiversité, du bien-être animal, du travail des enfants...). Les critères de mesures objectifs sont à développer et à codifier.

2.3.2. La qualité dans la filière caféicole

Ces différents aspects de la qualité ont pris toute leur place dans la filière caféicole. La qualité sanitaire *via* la détermination de l'ochratoxine A, mycotoxine produite par des champignons filamenteux du genre *Aspergillus* ou *Penicillium* selon les conditions de stockage, la mise en place de diverses mentions valorisantes du café (Agriculture Biologique, café gourmet, Appellation d'Origine Protégée) sont autant d'efforts de la part des acteurs de la filière afin de relancer ou de pérenniser la filière dans un contexte de concurrence et de volatilité des cours [8, 9, 10]. La démarche vers la qualité sociétale ou spécifique a été entreprise dans de nombreux pays (Burundi, Cameroun, Amérique Latine, Indonésie) associant pouvoirs public, producteurs, torréfacteurs, négociants et consommateurs. Elle a donné lieu à la rédaction d'un cahier des charges et sert de référentiel pour le projet « Bourbon Pointu » de La Réunion [11].

2.3.2.1. Le cahier des charges en vue de la création des cafés labellisés

De nos jours, la qualité d'un café se mesure à chaque étape, de la germination jusqu'au potentiel organoleptique de la tasse de café, souvent à l'aide de normes [12]. Cependant, pour qu'un café soit spécial et unique et donc reconnu comme un café d'excellence tels que le « specialty coffee » (café gourmet) ou un café d'origine protégée par ses pairs, le caféiculteur doit respecter trois « lois » dans la recherche de la qualité : les deux premières lois ont trait à l'aspect agronomique et à l'organisation des exploitations agricoles alors que la troisième loi fait appel aux techniques de transformations post-récolte [13].

Au delà du choix de l'espèce de café cultivé qui dépend de l'homme, la *première loi* prend donc acte au stade de la cerise sur l'arbre. En effet, le site de production avec ses conditions pédoclimatiques tels que le sol, l'altitude, la pluviométrie, la végétation environnante, les pratiques culturales, joue un rôle primordiale sur la qualité du café d'où la nécessité d'identifier les valeurs optimales de chaque facteur environnemental ou de trouver

la combinaison idéale entre ces paramètres afin « d'extérioriser » le potentiel biochimique de la graine de café vert.

La deuxième loi repose sur la préservation de l'espace de culture et concerne d'une part, les conditions climatiques qui restent néanmoins indépendantes de la volonté humaine et d'autre part, les pratiques culturales (nettoyage autour des pieds des caféiers, utilisation ou non de pesticides, type de récolte). Ces dernières détiennent une part non négligeable dans le maintien de la qualité d'un café d'une année à l'autre et donc dans la préservation d'une qualité tant recherchée.

Enfin, *la troisième loi* est celle de l'expression de toutes les qualités organoleptiques et peut se scinder en trois phases dont le processus de chacune est indépendant de l'autre mais dont les résultats à la fin de chacune d'elles sont liés entre eux comme dans une formulation d'un produit à la recherche d'une qualité homogène. La phase de la transformation post-récolte dépend originellement de l'espèce de café, de la localisation géographique et du potentiel financier du producteur, par la suite sa contribution à la qualité du grain de café dépend du savoir faire du producteur et de sa capacité à suivre et à respecter les paramètres techniques de la transformation post-récolte choisie tels que la température ambiante, la durée des phases de la transformation ou encore l'entreposage. La phase de la torréfaction qui est sans aucun doute, la phase la plus importante dans la révélation aromatique du café est entièrement soumise à la main et à l'œil de l'homme et de son expérience. Cette phase peut à elle seule transformer un café vert au pedigree reconnu en un café torréfié de qualité décevante et à l'inverse, dans une moindre mesure, peut produire un café torréfié honorable à partir d'un café vert loin d'être irréprochable. C'est pourquoi à quelques exceptions près, la tâche de la torréfaction est « délocalisée » du lieu de la production et est attribuée aux maîtres torréfacteurs qui, par leur savoir faire, vont identifier le potentiel aromatique du café et adopter un profil de torréfaction afin d'exprimer au mieux ce potentiel. Enfin, la phase de mouture et d'infusion qui s'avère être la plus aisée mais apportant sa contribution sur les attributs de la qualité finale du café se révèle être la phase déterminante dans l'obtention d'une reconnaissance mondiale des cafés labellisés dont le café gourmet et les cafés d'appellation d'origine protégée/contrôlée. En effet, la mouture conditionne à elle seule l'explosion ou non des arômes lors de l'infusion, une trop fine mouture provoquera une « over extraction » amenant à une destruction du potentiel aromatique du café en poudre et une mouture grossière inhibera le développement de ce potentiel aromatique. L'infusion quant à elle, quelque soit son appareillage, doit de plus en plus se standardiser (qualité de l'eau, ratio eau/poudre de café, température et durée

d'infusion) et pourquoi pas optimiser ces standards en relation avec le café produit, afin de ne pas compromettre la qualité du café en poudre et surtout afin de révéler toute ses qualités organoleptiques lors de la dégustation.

2.3.2.2. Le « *specialty coffee* » (Café gourmet)

▪ *Historique*

Dans un discours de 1978 à Montreuil en France, Erna Knutsen de la société Knutsen Coffee Ltd évoque pour la première fois la notion de « *specialty coffee* » en la définissant avec des mots simples « *special geographic microclimate produce beans with unique flavor profiles* ». Une nouvelle stratégie commerciale donne donc naissance à une dénomination huppée du grain de café ouvrant une voie nouvelle à la première denrée commerciale mondiale. Ce n'est que dans les années 1990 que le secteur du « *specialty coffee* » connaît son boom économique aux Etats-Unis du fait de l'importance des volumes de production du café propulsant l'offre à un niveau très supérieur à la demande et qui a finalement provoqué la chute des revenus des producteurs de café. Ces derniers sont confrontés à un choix cornélien, soit d'accepter la concurrence d'une production « *low cost* », soit de s'engager dans une recherche de différenciation de leur produit afin d'accéder à une qualité supérieure qui leur procurerait des revenus plus confortables mais n'ayant aucune garantie de bénéfices sur le long terme. C'est ainsi qu'une tendance appelée « *turn to quality* » [14] a vu le jour, celle d'associer une identité géographique à une qualité de café différente. Aujourd'hui, cette association se définit sous le terme de terroir. Utilisée originellement dans le monde viticole, elle s'étend maintenant à toutes les denrées alimentaires qui s'en emparent en les présentant sous forme de labels ou de certifications afin de mettre en avant leurs « *spécimens* » les plus élaborés et/ou savoureux pour le plus grand plaisir des consommateurs.

Actuellement, près de 90% des consommateurs considèrent le café, à l'image du vin, comme un produit doté d'un fort potentiel de différenciation commerciale du fait de la diversité des espèces, de la variabilité des conditions environnementales de culture et des différences de pratiques culturelles. Cette course à la différenciation, amène les producteurs ou les industries à repenser leurs approches productive et commerciale de leur café. Le secteur innovant des « *specialty coffee* », une niche commerciale en plein essor dont la part dans l'économie du café est passée de 1 à 20% en 25 ans, représentait, en 2006, un tiers des

ventes de café sur le sol des Etats-Unis soit un montant des ventes estimé à environ 13 milliards de dollars [15].

▪ *Caractéristiques du café labellisé « specialty coffee »*

Bien que les producteurs demeureront des défenseurs ardents de leur café et que le palais du consommateur restera à jamais le décideur dans l'appréciation organoleptique d'une tasse de café, le prix de vente de ce dernier sur les marchés financiers est le résultat conjoint d'un test de qualité sur un échantillon de café vert et de sa réputation [16]. De manière générale et selon des critères mondialement acceptés et utilisés, la qualité du café est soumise à des tests visuels sur un échantillon de 350 grammes de café vert. Le calcul du nombre de défauts des fèves conduit à une classification immédiate des cafés pour certains décideurs. Cependant, un consensus entre industriels orchestré et manœuvré par la SCAA (Specialty Coffee Association of America) a mis en place des protocoles et des valeurs standards de qualité tant au niveau du café vert que du café à la tasse. Après le test visuel du café vert, la SCAA rajoute une notation sur les propriétés organoleptiques de la tasse de café évaluée sur une échelle de 100 points. Les cafés admis au test du café vert et qui après dégustation obtiennent au minimum 80 points sont considérés comme des « specialty coffee » [17]. Les tableaux II et III nous montrent les deux types de défauts des fèves et la classification des cafés selon le nombre de défauts.

Tableau II
Description des deux types de défauts lors d'un test visuel sur 350 grammes de café vert.

Dénomination du défaut	Description du défaut
Défauts majeurs	grain noir, grain aigre, présence de cerise sèche, présence de champignons, de matières externes dans l'échantillon, trous de chenille en grande quantité.
Défauts mineurs	grain partiellement noir, partiellement aigre, parche, grains qui flottent, immatures, ridés, grains en coquille, grains cassés, coupés, fragments de cerises, trous de chenille en faible quantité.

Tableau III
Classification commerciale, mondialement utilisée, en fonction du nombre de défauts obtenus lors du test visuel sur café vert.

Classe	Dénomination commerciale	Nombre de défauts
Classe 1	Specialty Coffee	0-5
Classe 2	Premium Coffee	6-8
Classe 3	Exchange année	9-23
Classe 4	Inférieur à la norme de qualité	24-86
Classe 5	Off année	> 86

Le tableau IV récapitule les standards de qualité retenus par la SCAA pour obtenir le grade de « specialty coffee » concernant tous les Arabicas.

Tableau IV
Standards de qualité retenus par la SCAA pour tous les arabicas pour l'obtention du grade « specialty coffee ».

	Valeur standard	Conditions
Défauts mineurs	0	350 grammes de café vert gradés selon les protocoles de la SCAA
Défauts majeurs	< 5	
Humidité	10-12%	
Analyse sensorielle	>80 points	100 grammes de café boisson

▪ *Place du « specialty coffee » dans la course à la labellisation des produits*

La recherche de cette qualité, dans une différenciation circonscrite du produit par des indicateurs de qualité le long du process, astreint le producteur à suivre un cahier des charges et à être transparent sur la traçabilité de son produit. Plusieurs associations mondiales de café comme la SCAA ou son homologue en Europe le SCAE (Specialty Coffee Association of Europe) permettent aux producteurs, d'une part, de s'informer sur le secteur des « specialty coffee » par le biais de formations ou de protocoles mis en ligne sur Internet et, d'autre part, d'intégrer le cercle des cafés reconnus en évaluant leur café grâce à un barème de notation (Tableau IV) sur la qualité du grain vert jusqu'à la tasse de café, légiférant le droit d'obtention du label « specialty coffee ».

Cependant, cette normalisation des pratiques culturelles et de fabrication de cafés supérieurs tend à oublier le caractère imprévisible des conditions géoclimatiques et à omettre le caractère marginal du producteur avec sa culture, au sens large, de son café. Un approfondissement et un élargissement des « codes » permettant d'affiner ces standards

seraient une avancée dans la complète recherche de la qualité du café dont bénéficieraient les caféiculteurs. C'est ce que Niederhauser *et al.*, 2008 [18] a commencé à mettre en place avec son logiciel CINFO (Internet-based coffee information system). Ce logiciel, à entrées multiples, permet à tous les producteurs d'y insérer toutes les données de leur café, du grain vert à la tasse de café en passant par les données climatiques et les résultats d'analyses sensorielles. Cette base de données a la particularité d'être étroitement liée à la réalité du quotidien des producteurs dans leur activité et aussi, d'être l'interface en temps réel des interactions entre l'environnement et le café produit. Ce système d'information est un moyen parmi tant d'autres pour les producteurs labellisés ou pas, de se faire connaître par les acheteurs. De plus, il permet au producteur ou à l'acheteur d'avoir d'une part, un historique de données pédoclimatiques et d'autre part, d'avoir des indications sur la qualité organoleptique de leur café en comparaison avec d'autres permettant au caféiculteur de solliciter une labellisation de cafés supérieurs tel que « specialty coffee ».

D'autres labels existent, basés sur une éthique sociale et environnementale comme par exemples [19] :

- *Le label AB* qui certifie que 95% des produits utilisés sont issus de l'agriculture biologique,
- *Le label AOC* (Appellation d'Origine Contrôlée) qui garantit un produit originaire d'un pays, d'une région ou d'un terroir et dont la qualité et les caractéristiques sont dues à son milieu géographique,
- *Le label IGP* (Indication Géographique protégée) qui assure comme le label précédent que le produit est originaire d'un lieu précis mais que le lien entre la typicité du produit et son origine n'est que partiel,
- *Le label Max Havelaar* en France (Fair Trade en Angleterre) élaboré par Fair Trade Labelling Organisation (FLO) et certifié par FLO-Cert garantissant que le produit a été acheté à un prix « correct » aux producteurs et élaboré dans des conditions respectueuses des droits de l'Homme et de l'Environnement [20].

Le label ou le grade de « specialty coffee » qui est attribué aux rares cafés exempts de tous défauts au stade du café vert et dont le profil aromatique du café à la tasse se distingue des autres ne suffit plus dans la recherche de la différenciation et, par conséquent, il se doit d'être complémentaire à un label de localisation contrôlée. Un café de qualité exceptionnel labellisé comme un « specialty coffee » devient unique au monde s'il est localisé dans un espace géographique précis grâce à une AOC ou une IGP. Comme la

Colombie et la Jamaïque qui ont, d'ores et déjà, protégé leur café exceptionnel par une IGP comme le souligne Ky *et al.* [21].

3 - Le café à La Réunion

3.1. Historique [22, 23, 24]

L'Histoire débute au 18^{ème} siècle. L'île n'est réellement habitée que depuis le milieu du 17^{ème} siècle et demeure une escale sur la route des Indes. C'est au cours d'une de ces escales à l'île Bourbon en 1711 que D'Hardancourt, Directeur de la Compagnie Française des Indes Orientales découvre un caféier endémique poussant à l'état sauvage et produisant un « café un peu plus gros que celui de Moka située au Yémen et pointu par les extrémités. Par ailleurs, pendant ces mêmes années, le roi de France souhaite que l'île Bourbon devienne une terre de plantation et non plus uniquement une escale. Après deux tentatives d'implantation d'épices, le giroflier en 1681 et le poivrier en 1702, Louis XIV ordonne au navire « le Chasseur » en 1714 de rapporter sur son chemin de retour de Pondichéry, des plants de café de la région de Moka. Soixante jeunes caféiers sont donc embarqués et seuls vingt plants résistent au voyage et sont introduits à l'île Bourbon le 23 septembre 1715. Deux plants survivent à Saint-Denis et sont en fleurs en septembre 1717. Les premières graines sont récoltées au début de l'an 1718 et sur les 683 graines distribuées, seulement 117 plantules peuvent être développées. La multiplication s'avère difficile et la souche d'origine manque de disparaître ; un des deux plants périssant lors d'un cyclone en avril 1718. Les attentes en vue d'une production de café reposent donc sur l'unique survivant et les jeunes plants de ce café en provenance de Moka ainsi que sur le café endémique. La culture du café est encouragée par les autorités aussi bien à partir des plants endémiques que ceux d'importation. D'autres variétés en provenance de Moka sont introduites au cours du 18^{ème} siècle. Néanmoins, la culture du caféier endémique est abandonnée au profit des caféiers originaires d'Arabie à partir des années 1725 car ces derniers sont de meilleure qualité. Tout est alors mis en œuvre pour que ce café soit de la meilleure qualité :

- *Des directives* de la part du comptoir de Moka dans l'art de la culture, de la cueillette et du séchage des graines,

- *L'élimination* des graines défectueuses et *les soins* apportés au conditionnement avant expédition. L'ère de prospérité qui s'annonce pour le café est de courte durée. La

faillite financière de la Compagnie des Indes en 1764 et la reprise du commerce par l'administration française qui veut favoriser les Antilles finissent par ralentir la culture du café dans l'île. Au début du 19^{ème} siècle, la culture de la canne à sucre plus rentable, est mise en place pour assurer l'approvisionnement en sucre de la France suite à la perte de Saint-Domingue lors des guerres napoléoniennes de 1810 et devient l'objectif premier de l'agriculture de l'île. Cependant la découverte du Bourbon Pointu permet la plantation de vergers caféiers dans les altitudes plus élevées et ainsi aux agriculteurs de ne pas mettre tous les œufs dans le même panier en jouant sur les deux produits sucre et café.

Entre 1825-1855, l'évolution des zones de production caféière dans cette période correspond à la fois à l'état de vieillissement des premiers vergers de 100 ans d'âge, à une série de cyclones dévastateurs et à la maladie des bois noirs qui diminuent fortement les récoltes. Cette situation provoque l'installation de la canne à sucre dans les anciennes zones caféières mais favorise la plantation de nouvelles caféières dans les zones de plus hautes altitudes avec du Bourbon Pointu qui ne craint pas les rigueurs de climat d'altitude.

Entre 1865-1880 la forte hausse des cours mondiaux du café des années 1870, la création des Messageries Maritimes avec les facilités de fret qui en découlent puis l'ouverture du Canal de Suez, sont autant de facteurs favorables concomitants qui expliquent le renouveau de la caféiculture à la Réunion. Ainsi la progression des superficies cultivées en café Bourbon Pointu passent de 2000 hectares en 1865 à 6000 hectares en 1880. On constate donc dans les années 1880 que le café n'est pas loin de retrouver les superficies qu'il occupait à la fin du XVIII^e siècle. Mais les caféières sont désormais situées dans les hauts et plantées en Bourbon Pointu.

En 1878 Jules Potier, directeur du Jardin colonial, ramène de l'île Maurice quelques feuilles de caféier atteintes par la maladie "*hemileia vastatrix*" afin de pouvoir l'étudier. Cet acte est à l'origine de la propagation de la maladie qui va fortement réduire la production réunionnaise de café de 535 tonnes en 1878 à 190 tonnes en 1883. En l'espace de six années, le champignon anéantit le potentiel productif de l'ensemble des caféières à la Réunion.

La tradition caféière renaît avec le projet « Café Bourbon Pointu » qui débute en 2002. Le Conseil Régional encourage la diversification des cultures. Seule la production d'un café de grande qualité est envisagée afin d'être compétitif vis à vis des pays producteurs (Brésil, Vietnam, Guatemala,...). Ce projet est mis en œuvre par le CIRAD et les plants sont arrivés en période de production courant 2005.

3.2. Le « Bourbon Pointu »

3.2.1. Description botanique

Le « Bourbon Pointu » est déjà présent en 1780 à La Réunion. Il est désigné sous le nom scientifique de *Coffea arabica* var. *laurina*. Il est issu de la mutation spontanée de la variété Bourbon (figure 3).

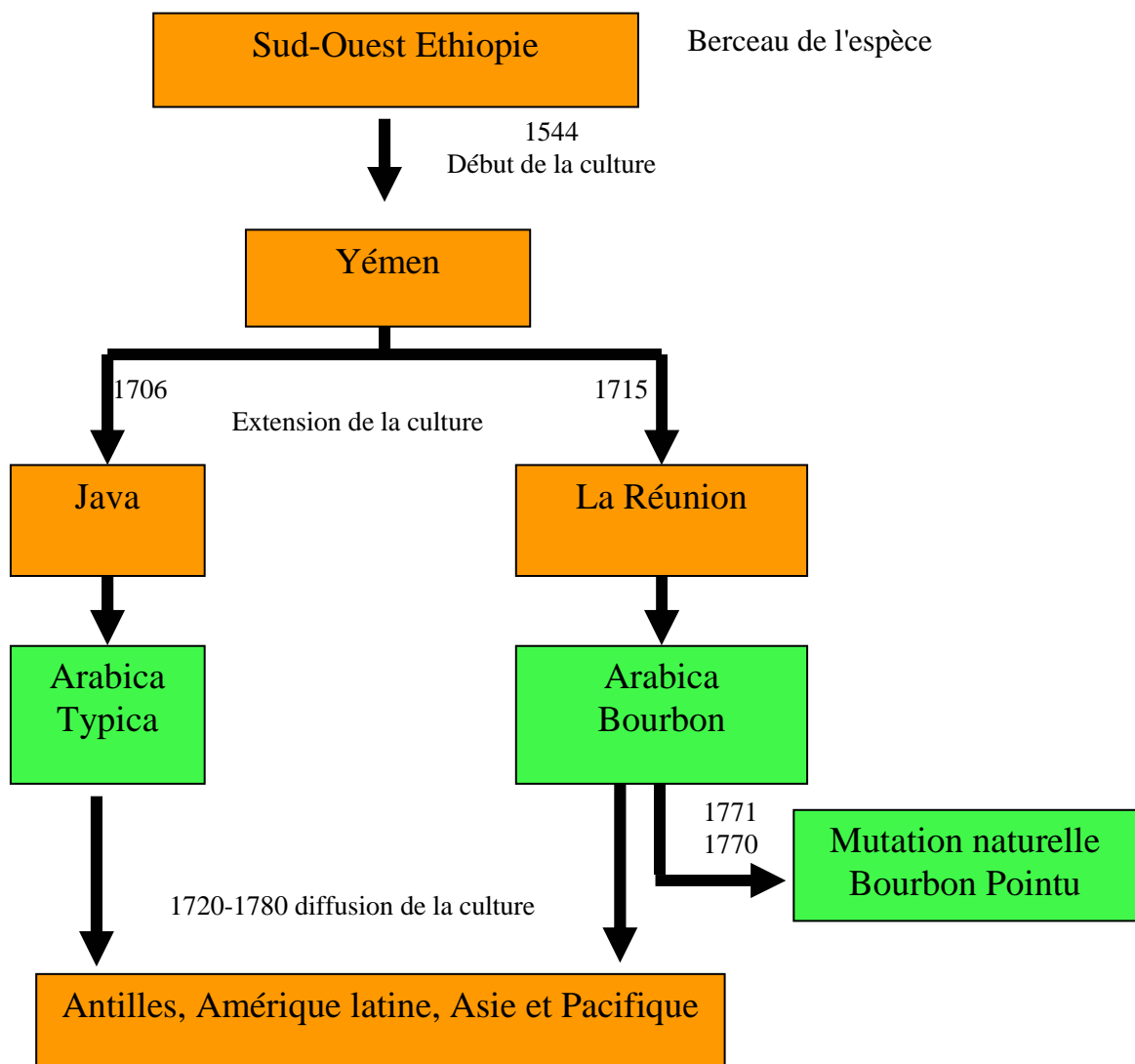


Figure 3 : Origine du café « Bourbon Pointu » [25].

Du point de vue morphologique, il se diffère du caféier d'Arabie par son port de forme conique avec des ramifications latérales denses, par ses feuilles plus courtes de forme elliptique, par ses grains aux extrémités pointues, (Figure 4) [22].



Caféier Arabica Bourbon



Caféier Arabica « Bourbon Pointu »



Feuilles Arabica Bourbon

Feuilles Arabica « Bourbon Pointu »



Graines Arabica Bourbon

Graines Arabica « Bourbon Pointu »

Figure 4 : Différences morphologiques des différentes parties des deux variétés d'Arabica Bourbon (Parent et mutant) [25].

3.2.2. Le choix des parcelles

L'île de La Réunion est une île compacte, très montagneuse et fortement accidentée puisque pour un diamètre moyen de 60 kilomètres, le point culminant central (Piton des Neiges) se situe à 3069 mètres d'altitude. L'île présente une géographie physique extrêmement contrastée, du point de vue géologique et climatique. La Réunion doit son climat contrasté à sa situation océanique, sa latitude australe assez basse, à la « compacité » de son orographie et son altitude élevée.

La forte influence océanique explique, en plus d'une latitude relativement basse, des températures moyennes assez tempérées et d'assez faibles amplitudes, pour une région tropicale. Toutefois, La Réunion est caractérisée par deux saisons, la saison la plus chaude correspondant aux mois de décembre à avril et la saison la plus fraîche aux mois de mai à novembre.

La nature des sols a aussi une importance primordiale. D'après une étude de Raunet, 1991[26] sur la fertilité des sols réunionnais cultivés, les sols ferrallitiques et les sols bruns sont les plus vieux sols de l'île et se situent principalement dans le Nord-Est. Ils contiennent des oxydes métalliques dont le fer libre qui colore ces sols en brun ou rouge selon leur âge et leur localisation dans le paysage

Les sols bruns andiques (ou cambisols andiques) sont intermédiaires entre les sols bruns et les andiques. Ce sont d'anciens andosols situés en zone plus sèche et évoluant lentement vers des sols bruns. Ils se situent essentiellement sur les cendres des zones de moyenne altitude de l'Ouest, sur des coulées faiblement altérées.

Les andosols non perhydratés, formés sur des cendres volcaniques, ont une teneur élevée en matières organiques, en éléments nutritifs et en eau.

En conséquence, ces particularités géographiques et topographiques d'une part, et d'autre part, l'exposition aux alizés, font que l'île est découpée en deux zones (zone sous le vent : Ouest, Sud-Ouest et zone au vent : Est, Sud-Est) dont les paramètres climatiques (pluviométrie, température, force du vent, rayonnement) sont très différents [27]. Ces particularités, associées à la nature des sols, ont décidé de la zone d'implantation des parcelles précisées dans la figure 5.

La production du « Bourbon Pointu » est réalisée aux altitudes de 500-1200 mètres dans des terroirs bien spécifiques comme le montre la figure 5 représentant la cartographie des caféiculteurs.

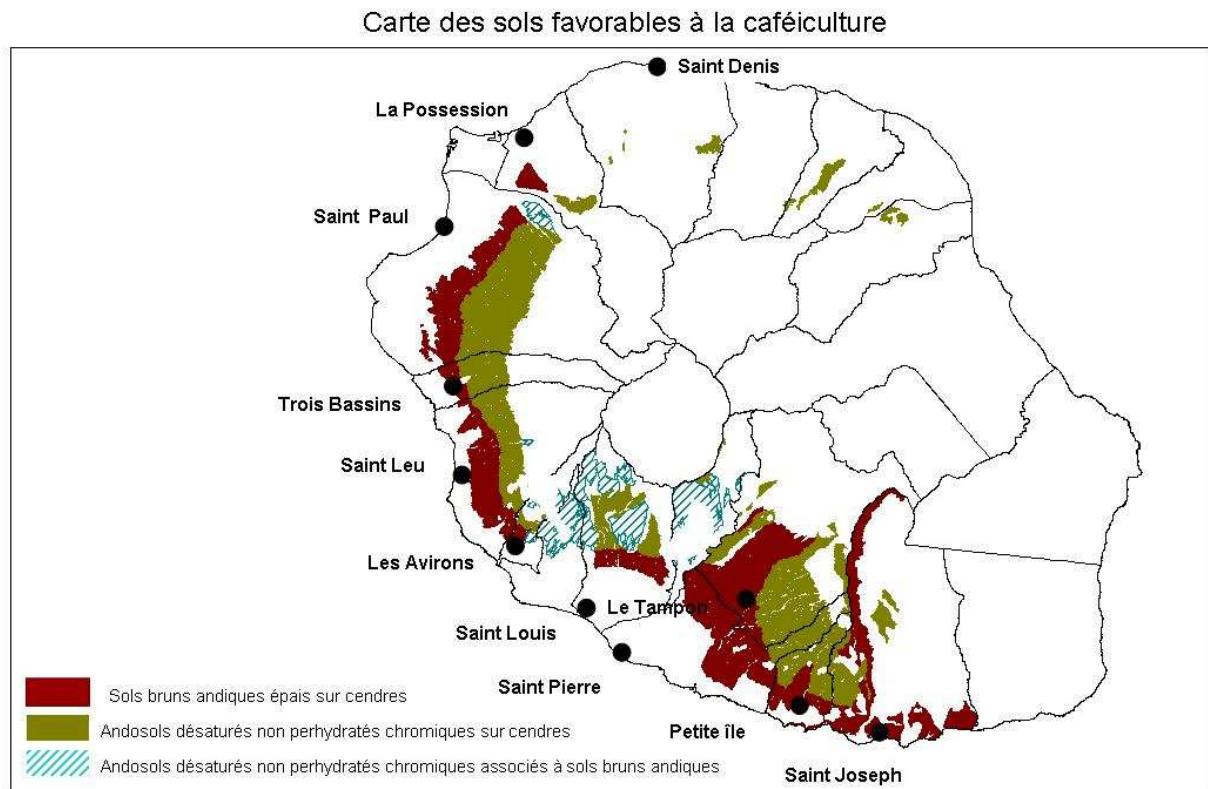


Figure 5 : Terroirs du « Bourbon Pointu ».

Les sols les plus favorables sont des sols anciens issus du massif du Piton des Neiges :

- Sols bruns andiques épais sur cendres,
- Andosols désaturés non perhydratés chromiques sur cendres,
- Gratons à sols bruns andiques associés à andosols non perhydratés sur cendres

De plus, les sols favorables correspondant aux zones marquées sont situés dans des zones dont les paramètres climatiques sont aussi favorables pour :

- La pluviométrie (pluviométrie annuelle comprise entre 750 et 1 750 mm) avec un maximum de 3 mois consécutifs enregistrant des précipitations inférieures à 25 mm/mois.
- Les températures
 - Une température moyenne des minima annuels compris entre 12 et 16°C,
 - Une température moyenne annuelle comprise entre 15 et 19°C,
 - Une température moyenne des maxima annuels compris entre 22 et 24°C.
- La radiation solaire globale
 - Une moyenne mensuelle comprise entre 1 100 et 1 900 MJ,
 - Une radiation globale annuelle comprise entre 17 000 et 20 000 MJ.

3.2.3. Traitement du « Bourbon Pointu » après récolte

Afin que le « Bourbon Pointu » puisse exprimer toutes ses qualités gustatives, quatre étapes sont importantes avant sa commercialisation :

- La cueillette
- Le traitement post-récolte,
- L'usinage,
- La torréfaction.

➤ **La cueillette**, seules les cerises de couleur rouge à rouge vin de bordeaux sont prélevées par une cueillette manuelle sélective. La cueillette est une étape très importante pour les caractéristiques à la tasse. La transformation post-récolte, l'usinage et la torréfaction permettront d'exprimer plus ou moins ces caractéristiques qualitatives.

➤ **La transformation post-récolte** est une étape importante dans l'expression aromatique. Il diffère selon les variétés de cafés :

- le traitement par voie sèche pour les Robusta
- et le traitement par voie humide pour les Arabica dont est issu le « Bourbon Pointu ».

La transformation par voie humide demande plus de travail, de matériel et de technicité. Elle est donc plus élaborée et comporte plusieurs étapes et nécessite un appareillage mécanique et de grandes quantités d'eau. Elle comporte successivement diverses étapes :

- **Le Triage** : les cerises sont immergées dans des bacs remplis d'eau; les cerises surnageantes et les débris sont éliminés.

- **Le Dépulpage** : les cerises sont dépulpées afin de séparer la pulpe du fruit du grain de café. Le dépulpage s'effectue avec une machine qui presse les cerises afin de séparer la peau et la chair du fruit du grain recouvert de son enveloppe mucilagineuse.

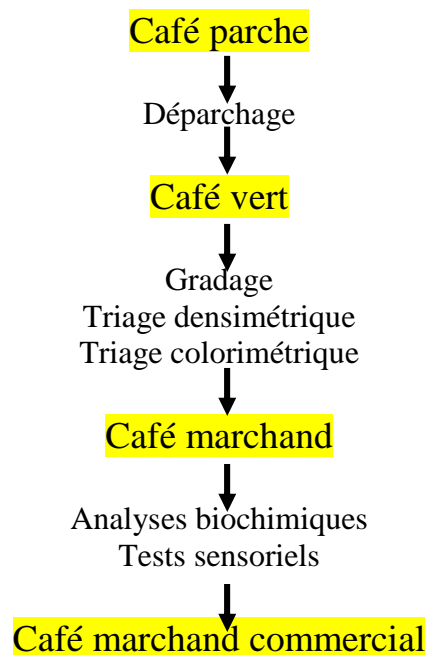
- **La Démucilagination/Fermentation/macération** : Les grains de café en parche sont alors mis en fermentation durant une période allant de 12 à 36 heures, selon la température ambiante. Cette fermentation permet d'enlever plus facilement sur les parches les restes de mucilage. La fermentation est parfois accélérée en utilisant des enzymes pectiques par une démucilagination mécanique ou chimique.

- *Le Lavage* : les grains de café en parche sont lavés afin de supprimer toute trace de mucilage adhérent au grain.

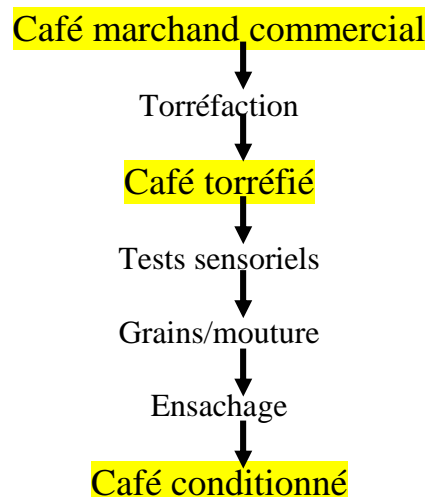
- *Le Séchage* : à ce stade, le café en parche contient encore environ 50 % d'humidité. Il est mis à sécher durant une quinzaine de jours au soleil ou il est séché mécaniquement. Une fois séché, le café en parche ne contient plus que 10 à 12 % d'humidité.

Le rendement du café en parche en café vert traité par voie humide est de l'ordre de 18 à 19 % pour les Arabicas et de 13,5 à 14,5 % pour le Bourbon Pointu [28, 29, 30].

➤ **L'usinage** est résumé dans l'organigramme suivant :



➤ **La torréfaction** est résumée dans l'organigramme suivant :



Conclusion

Les différentes phases de:

- Production des plants de caféier,
- Sélection et de formation des caféiculteurs expérimentateurs,
- Création des vergers expérimentaux,
- Suivi des performances agronomiques du matériel végétal
- Définition des itinéraires techniques en expérimentation,
- Identification des terroirs favorables
- Recrutement et de formation d'un jury de dégustateurs,

étant achevées, la détermination des critères permettant de définir et de mesurer les qualités olfactive et gustative du « Bourbon pointu » pouvait alors être abordée et fait l'objet de ce travail de thèse.

Références bibliographiques

1. Leroy J. F. *Evolution et taxogénèse chez les caféiers. Hypothèse sur leur origine*. Ed. Comptes rendus de l'académie des sciences. Paris, **1980**, 593-596.
2. Bridson D. M. Nomenclatural notes on *Psilanthus*, including *Coffea* sect. *Paracoffea* (Rubiceae tribe *Coffea*). *Kew bulletin*, **1986**, 42, 453-460.
3. Charrier A. L'intercompatibilité des clones de caféiers cultivés sur la Côte Est malgache. *Café Cacao Thé*, **1972**, 16, 111-122.
4. International Coffee Organisation, *Statistiques Commerciales*. <http://www.ico.org/>. Date de connexion: janvier **2011**.
5. Norme internationale ISO 8402 Qualité-vocabulaire. *Organisation Internationale de Normalisation*, Genève, **1986**.
6. Creysset P. La certification des systèmes d'assurance-qualité dans le secteur agroalimentaire. *Rapport de mission effectué pour le ministère de l'agriculture*, France, **1989**, 43 pages.
7. Lagrange L., Monticelli C., Sylvander B. Avis sur le développement des signes d'identification de la qualité et de l'origine des produits agricoles et alimentaires, nationaux et communautaires. *Rapport du groupe de travail du Conseil National de l'Alimentation, CNA*, **2003**, avis n° 45.
8. Amsallem I. *Indications géographiques, développement local et préservation des diversités biologiques et culturelles*. Ed. Savoirs communs, France, **2010**, n° 9.
9. Mawardi S., Avelino J., Sallee B., Perriot J.J., Sautier D., Lelong C., Jacquet M., Ribbeyre F., Keller V. Developing geographical indication protection in Indonesia : Bali Kintamani arabica coffee as a preliminary case. *Seminar on geographical indication: a land of opportunities. Indonesia*, **2005**.
10. Berry D. *Plantations, Recherche, Développement*. Recherche et caféiculture. Ed. CIRAD, France, **2002**.
11. Montagnon C. *Cafés : terroirs et qualités*. Ed. CIRAD, France, **2003**.
12. Agence Française de Normalisation, AFNOR, <http://www.afnor.org/>. Date de connexion: janvier **2011**.
13. Rhinehart R. What is Specialty Coffee? *The Specialty Coffee Association of America (SCAA)*, <http://www.scaa.org/>, **2009**.
14. Neilson J. Institutions, the governance of quality and on-farm value retention for Indonesian specialty coffee. *Singapore Journal of Tropical Geography*, **2007**, 28, 188-204.
15. Hainmueller J., Hiscox M. J., Sequeira S. Consumer Demand for the Fair Trade Label: Evidence from a Field Experiment. *Social Science Research Network*, **2011**, 1801942.
16. Donnet M.L., Weatherspoon D.D. Effect of sensory and reputation quality attributes on specialty coffee prices. *American Agricultural Economics Association Annual Meeting. California*, **2006**.
17. SCAA Protocols. Grading Green Coffees-Cupping Specialty Coffees. *Published by the Specialty Coffee Association of America (SCAA)*, **2009**.
18. Niederhauser N., Oberthur T., Kattinig S., Cock J. Information and its management for differentiation of agricultural products: the example of specialty coffee. *Computers and Electronics in Agriculture*. **2008**, 61, 241-253.
19. Pierrot J., Giovanucci D., Kasterine A. Trends in the Trade of Certified Coffees. *Social Science Research Network*, **2010**, 1736842.

20. Comar A., Maréchal G. Rapport Bolivie « Normes II » Consultation sur le terrain des acteurs du Sud: perception, gouvernance et effets des normes. *Groupe ISF-Rennes*, **2007**.
21. Teuber R. Geographical indications of origin as a tool of product differentiation: the case of coffee. *Journal of International Food and Agribusiness Marketing*. **2010**, 22, 277-298.
22. Lécolier A. Caractérisation de certains impacts de la mutation *Laurina* chez *Coffea arabica* L. aux niveaux histo-morphologique et moléculaire. *Thèse*. Université de la Réunion-CIRAD, **2006**.
23. Lécolier A, Besse P., Charrier A., Tchakaloff T.N., Noirot M. Unraveling the origin of *Coffea arabica* « Bourbon pointu » from La Réunion: a historical and scientific perspective. *Biomedical and Life Sciences*, **2009**, 168, 1-10.
24. Lavergne R. *Fleurs de Bourbon*. Ile de La Réunion, **1980**, Tome 3, p 127.
25. Descroix F. *Documents internes*. Coopérative Bourbon pointu, CIRAD, Ile de la Réunion.
26. Raunet M. *Le milieu physique et les sols de l'île de la Réunion : Conséquences pour la mise en valeur agricole*, **1991**, Document CIRAD.
27. Chabanne A. *Les systèmes de cultures avec couverture végétale pour les hauts de la Réunion*, **2003**, Document CIRAD.
28. Rothfos B. *Coffee Production*. Ed. Gordian-Max-Rieck, Hamburg, **1980**.
29. Clarke R. J., Macrae R. *Coffee Vol. 2 - Technology*. Ed. Elsevier Applied Science Publishers, London, U.K., **1987**.
30. Sivetz M., Desrosier N. W. *Coffee technology*. Ed. AVI Publishing Company, Westport, Connecticut, **1979**.

Chapitre II

*Composition chimique du café
« Bourbon Pointu » suivi de son évolution*



Introduction

Introduire la notion de la qualité dans une filière nécessite la définition et la mise au point de critères satisfaisant à la fois les producteurs, les transformateurs et les consommateurs. Les critères choisis doivent pour les producteurs et les transformateurs différencier les divers produits de manière la plus objective possible et pour le consommateur, ces critères doivent assurer la crédibilité du produit. Dans la filière caféicole, les Arabicas ont une valeur marchande deux fois plus élevée que les Robusta avec une réputation variable selon les régions productrices. Les travaux relatifs à la qualité du café vont de l'amélioration des techniques agricoles et des traitements post-récolte au contrôle de l'origine géographique et de l'adultération des cafés commerciaux qu'ils soient, génériques de grande consommation ou spécifiques de qualité gustative supérieure ou encore sociétaux labellisés « commerce équitable » à titre d'exemple [1, 2, 3, 4, 5]. De nombreuses autres études ont été menées sur la différenciation botanique des cafés verts ou torréfiés entre les espèces Arabica et Robusta à partir de critères physico-chimiques ou chimiques [6,7]. Elles indiquent une composition biochimique différente du café vert selon les deux espèces et les compositions chimiques présentent même des variations intra-espèces. Elle est aussi influencée par plusieurs facteurs [8, 9, 10, 11] :

- Le mode de transformation post-récolte du café vert par la voie sèche ou humide engendre un stress au niveau des activités métaboliques dans les grains de café vert. Ce stress métabolique est responsable de nombreux changements dans la composition biochimique du café vert et par conséquent, induit des différences au niveau de leur qualité.
- La zone géographique (altitude, sol) et les conditions climatiques engendrent des différences dans la composition biochimique du café vert entre les différentes espèces.

Le café « Bourbon Pointu » de l'île de La Réunion issu de la mutation Laurina est un *Coffea arabica* var. *laurina*. Cette mutation a introduit non seulement des modifications de composition chimique mais aussi de morphologie. Les études les plus récentes menées sur le « Bourbon Pointu » sont celles de A. Lécolier et M. R. Sondahl au niveau génétique [12, 13] et de I.Técher et de T. Joët au niveau de sa composition chimique [14, 15]. Dans une optique d'obtention d'un produit spécifique de grande qualité gustative, l'acquisition d'autres connaissances concernant la variabilité de la composition chimique du café vert en fonction des conditions géoclimatiques ou des traitements post-récolte au sein de l'espèce Arabica et du comportement de ce café en fonction du processus de torréfaction s'avère donc nécessaire.

1 - Etude du café vert

1.1. Distinctions de l'origine botanique et géographique des cafés

L'étude de la composition chimique de diverses classes de molécules a permis de différencier non seulement, les Robusta des Arabica, mais également dans certains cas leur origines géographiques :

- La fraction amino-acide totale est plus élevée dans le Robusta que dans l'Arabica [16, 17], les variétés Robusta et Arabica provenant de régions très diverses (Ethiopie, Indonésie, Yémen, Amérique centrale et du sud, Hawaï, Papouasie -Nouvelle Guinée, Vietnam, Afrique). Casual montre que les énantiomères L- Leucine et D-Alanine caractérisent les grains de café vert du type Robusta. Comme Casual, Murkovic trouve comparativement, que la fraction aminoacide présente une gamme plus étendue en acides aminés qualitativement et quantitativement chez les Robusta plutôt que chez les Arabicas. Les arabicas présentent une teneur en proline plus élevée.

- Les sucres : plusieurs types de polysaccharides sont présents dans les grains de café vert : la cellulose, les galactomannanes et les arabinogalactannes de type II, les pectines, les xyloglucanes [18]. Selon Fischer *et al.* (2001) [19], la teneur globale de la fraction polysacharridique totale différencie peu le Robusta de l'Arabica. Du point de vue structural, les polysaccharides de type arabinogalactane sont plus ramifiés et plus longs dans le Robusta que les arabinogalactannes présents dans l'Arabica. Parmi les sucres simples, le saccharose est le plus abondant dans le café et permet de distinguer les deux variétés ; les Arabica étant plus riches que les Robusta en saccharose [20, 21]. Selon Clark (2003) [22], elle représente 8% du poids sec dans les Arabica et de 4% dans le Robusta. Le glucose et le fructose sont des sucres mineurs, respectivement environ au maximum 0,22 et 0,6% du poids sec [17].

- La trigonelline et des dérivés de xanthine dont la caféine et la théophylline font partie de la famille des alcaloïdes. La trigonelline caractérise les Arabica [20, 21] alors que la teneur en caféine et en théophylline [23, 24] caractérise les Robusta. Les méthylxanthines peuvent être des indicateurs géographiques de la zone de production des Robusta [24] comme la théophylline, marqueur du Robusta congolais.

- Les composés phénoliques : Plusieurs classes peuvent être des marqueurs potentiels aussi bien botanique que géographique : les dérivés de l'acide chlorogénique aussi bien dans l'Arabica que dans le Robusta de diverses régions [25, 26, 27] les dérivés de l'acide

hydroxycinnamique [28], les isoflavones [29]. *Coffea canephora* var. *robusta* contient plus d'acide 3,4-diméthoxycinnamique (0,237-0,691 g/kg) que *Coffea arabica* (0,016-0,095 g/kg). Les dérivés de l'acide chlorogénique permettent de distinguer les génotypes au sein d'une variété Arabica ou Robusta ou d'hybride. Plus récemment, une quantification des isoflavones présente une teneur six fois plus importante dans le Robusta que dans l'Arabica aussi bien dans les grains de café verts, torréfiés ou en boisson.

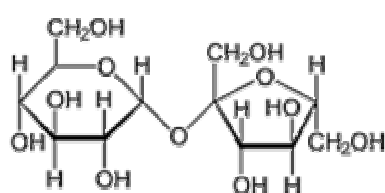
- Les différentes classes de lipides et de composés lipophiles sont très recherchées dans une approche chimiotaxonomique : acides gras libres [30], triacylglycérols [31], stérols, diterpènes, tocophérols. En effet, la composition en triglycérides, stérols et triterpènes est un des critères utilisé dans l'identification des espèces d'origine marine (éponges, ascidies...) [32, 33] ou terrestre (sapindacées, cucurbitacées...) [34, 35]. Les teneurs en α -tocophérol et β -tocophérol sont respectivement environ de 2,7 mg/100g et de 8 mg/100g pour les grains d'Arabica non torréfiés et de 1,7 mg/100g et 2,1/100g dans les grains verts de Robusta. Ces tocophérols sont peu dégradés lors de la torréfaction, le β -tocophérol étant plus sensible avec une concentration moindre de 25% dans les Robusta torréfiés [36, 37]. La fraction diterpénique à structure kaurénoïde comprend le cafestol, le kahwéol, le 16-O-méthylkahwéol et le 16-O-méthylcafestol. A l'exception du 16-O-méthylkahwéol qui est un alcool sous forme libre, les trois autres structures sont estérifiées avec divers acides gras. Le cafestol et le kahwéol peuvent se dégrader lors de la torréfaction en deux dérivés aldéhydiques : le cafestal et le kahwéal (Speer, 2006). Au moyen de la spectroscopie RAMAN à transformée de Fourier [38], il est possible de distinguer les Arabicas des Robusta par la teneur en Kahwéol (0,1 – 0,3 g/100g de matière sèche dans les Arabicas et seulement à l'état de traces dans le Robusta). La fraction stérolique montre une richesse plus importante en 24-méthylènecholestérol et en D5-avénastérol dans le Robusta que dans l'Arabica [39]. La coïncidence entre le profil en acides gras libres et les études phylogéniques des cafés d'origine africaine montre que la détermination des acides gras est une des pistes les plus encourageantes pour la chimiotaxonomie [40]. En effet, 90% d'Arabica ont pu être discriminés en fonction de leurs origines botanique et géographique [41].

- L'analyse des ratios isotopiques en ^{15}N , ^{13}C , ^{11}B , ^{87}Sr est aussi une technique performante pour l'attribution de terroirs [14, 42].

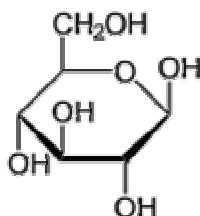
1.2. Composition chimique globale du « Bourbon Pointu »

La figure 6 présente les molécules qui ont été identifiées et quantifiées sur l'ensemble des échantillons des récoltes de 2006 et 2007.

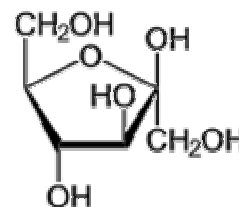
Les sucres



Saccharose

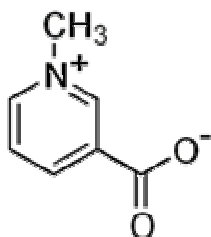


Glucose

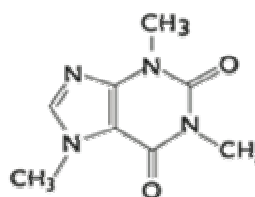


Fructose

Les Alcaloïdes



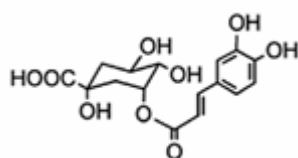
Trigonelline



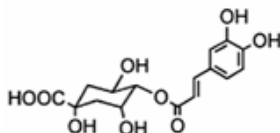
Caféine

Les Composés phénoliques

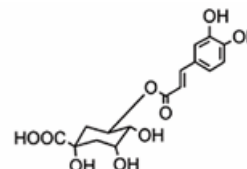
- Les dérivés de l'acide chlorogénique



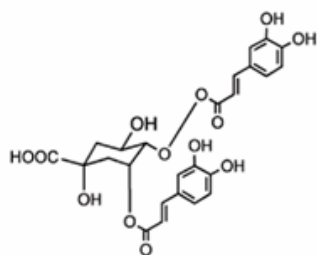
Acide caféoyl-3-quinique
(3-CQA)



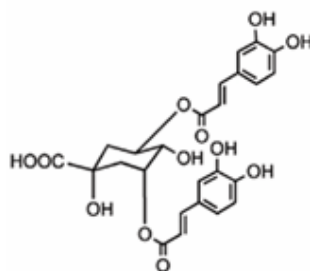
Acide caféoyl-4-quinique
(4-CQA)



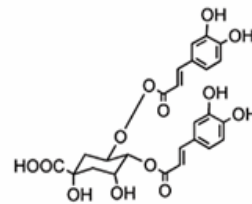
Acide caféoyl-5-quinique
(5-CQA)



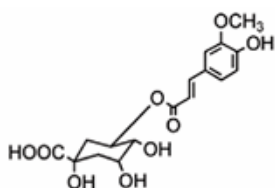
Acide dicaféoyl-3,4-quinique
(3,4-diCQA)



Acide dicaféoyl-3,5-quinique
(3,5-diCQA)

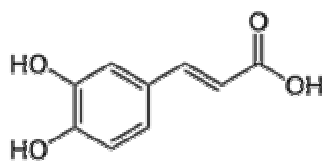


Acide dicaféoyl-4,5-quinique
(4,5-diCQA)



Acide féruloyl-5-quinique
(5-FQA)

- Le Dérivé de l'acide cinnamique



Acide caféique

Les acides gras



Acide palmitique (C16:0)



Acide stéarique (C18:0)



Acide arachidique (C20:0)



Acide oléique (C18:1 n-9)



Acide linoléique (C18:2 cc)



Acide α -linoléique (C18:3 n-3)

Figure 6 : Composés biochimiques identifiés et quantifiés dans le café vert « Bourbon Pointu ».

La détermination qualitative et quantitative (moyenne, maximum, minimum, écart-type) des composés du café vert « Bourbon Pointu » pour tous les échantillons (216) des deux années de récoltes ainsi que les teneurs issues de la littérature de ces composés dans l'espèce Arabica sont reportées dans le tableau V. Les concentrations des différents composés biochimiques, sont exprimées en poids pour 100 grammes de matière sèche de café vert.

Tableau V
Composition globale du café vert « Bourbon Pointu » (récoltes 2006 et 2007).

Composés	Moyenne (% MS)	Max (% MS)	Min (% MS)	Ecart type	Teneurs biblio. (% MS)
saccharose	7,08	9,22	5,25	0,66	7,40 - 11,1
glucose	0,04	0,09	0,01	0,02	0,01 - 0,10
fructose	0,03	0,09	0,01	0,03	0,01 - 0,10
trigonelline	1,34	1,49	1,23	0,08	0,88 - 1,77
caféine	0,75	0,80	0,72	0,02	0,96 - 1,62
acide caféique	0,01	0,02	0,01	0,01	0,001 - 0,05
Σ acides chloro.	6,85	7,97	5,27	0,56	6,70 - 9,20
3-CQA	0,30	0,40	0,19	0,04	0,16 - 0,25
5-CQA	4,72	5,73	3,44	0,43	2,15 - 4,85
4-CQA	0,48	0,64	0,15	0,09	0,20 - 0,51
5-FQA	0,36	0,52	0,13	0,06	0,08 - 0,22
3,4-diCQA	0,14	0,24	0,04	0,03	0,08 - 0,17
3,5-diCQA	0,61	0,87	0,19	0,11	0,17 - 0,36
4,5-diCQA	0,23	0,40	0,07	0,06	0,18 - 0,38
acides gras totaux	14,41	16,55	12,59	0,67	10 - 18
C16:0	5,02	5,83	4,50	0,27	4,20 - 6,75
C18:0	1,01	1,31	0,83	0,09	0,70 - 1,45
C18:1 n-9	1,04	1,33	0,75	0,14	0,85 - 1,50
C18:2 cc	6,45	7,74	5,59	0,45	4,45 - 7,85
C20:0	0,33	0,46	0,27	0,03	0,20 - 0,85
C18:3 n-3	0,27	0,31	0,23	0,02	0,10 - 0,35

La composition chimique globale, y compris pour les valeurs minimales et maximales dans le café vert « Bourbon Pointu », est en concordance avec celle publiée par Clarke à propos des Arabicas [43] à l'exception de la teneur en caféine qui reste faible par rapport aux autres Arabicas [20, 44]. Il est à noter que ces résultats sont aussi en adéquation avec les données de Joët *et al.*, (2010) [15] relatives à la composition du café vert du « Bourbon pointu » en fonction de la maturité des grains, provenant d'autres terroirs que ceux étudiés ici. Une analyse plus fine des constituants de chaque famille de composés montre que :

- Pour les oligosaccharides, le saccharose est le composé majoritaire et seuls deux composés sont minoritaires, le glucose et le fructose ont été identifiés. Cette composition qualitative et

quantitative reste en accord avec celle de Murkovic *et al.*, (2006) [17] concernant des Arabicas.

- La caféine et la trigonelline sont les deux alcaloïdes recherchés dans le « Bourbon Pointu ». La teneur en caféine est conforme à la gamme des concentrations moyennes (0,49-0,71%±0,1) reportée par Baumann *et al.*, (1998) [45] pour le *C. arabica* cv *laurina* cueilli au Brésil. Une teneur (0,6-0,7%), quasi similaire, est déjà signalée par Charrier en 1975 sur le « Bourbon Pointu », variété Leroy cultivée à la Réunion. Selon Leroy, cette constance serait due à une action prépondérante des génotypes et qu'« étant donné la stabilité des classements, quelque soit le lieu de culture, l'interaction génotype-milieu est probablement faible ». Il faudrait donc voir si les variations peuvent s'expliquer par les effets « années, dates de récolte » ou par les traitements post-récolte [46]. La trigonelline est un composé moins sélectif que la caféine dans la discrimination entre Arabica et Robusta. Ainsi, il est impossible d'identifier des hybrides entre le Robusta et l'Arabica sur la base de ce seul critère selon Bertrand *et al.*, (2005) [47], les gammes des teneurs dans les grains de café vert entre ces deux espèces se juxtaposant (1-1,2% pour *C. arabica* et 0,6-1,7% pour *C. canephora*) [48].

- Dans le groupe des polyphénols, l'acide caféoyl-5-quinique (5-CQA) (4,72 %), l'acide dicaféoyl-3,5-quinique (3,5-diCQA) (0,61%), l'acide caféoyl-4-quinique (4-CQA) (0,48%), l'acide féruloyl-5-quinique (5-FQA) (0,36%), l'acide caféoyl-3-quinique (3-CQA) (0,30%), l'acide dicaféoyl-4,5-quinique (4,5-diCQA) (0,23%), l'acide dicaféoyl-3,4-quinique (3,4-diCQA) (0,14%) sont des dérivés identifiés de l'acide chlorogénique et l'acide caféique (0,1%) [41, 49]. Le 5-CQA est le composé majoritaire des acides chlorogéniques de grains de cafés verts du *C. arabica* var. *Bourbon* et du *C. arabica* var. *Herloom* cultivés au Brésil et en Ethiopie, *C. arabica* var. *Bourbon* étant parent du « Bourbon Pointu » et originaire d'Ethiopie [50]. De plus, la part des isomères CQA représente 80,2% de la fraction totale des acides chlorogéniques ; les isomères diCQA n'étant représentés qu'à hauteur de 14,3%. Cette concentration plus élevée en CQA se retrouve également dans d'autres cafés [51, 52].

- La fraction lipidique se révèle riche en acide palmitique (C16:0) (5,02%) et en acide linoléique (C18:2 cc) (6,45%), acides gras présents chez tous les Rubiacées. L'acide arachidonique (C20:0) présent dans les grains à une teneur de moins de 1% devient un des composés majoritaires dans les feuilles de *Coffea* [53]. Par ailleurs, le ratio entre la proportion d'acide stéarique (C18:0) (1,01%) et la proportion d'acide oléique (C18:1 n-9) (1,04%) proche de 1 est un des critères de classification du « Bourbon Pointu » parmi les Arabica ; la

proportion d'acide stéarique est notablement plus faible que celle de l'acide oléique dans les Robusta [39].

1.3. Evolution de la composition chimique

La composition chimique évolue selon les facteurs climatiques (température, hygrométrie, ensoleillement), la zone de culture (nature du sol, altitude), les traitements post-récolte. Certains de ces facteurs environnementaux peuvent être étroitement liés à l'image de la température qui est dépendante de l'altitude et qui a une influence sur le séchage des grains lors du traitement post-récolte. Les facteurs climatiques sont variables selon les années et interagissent alors avec les autres facteurs. Le suivi de cette composition en fonction de ces paramètres est effectué au cours des deux années et témoigne de la constance de la qualité.

1.3.1. Composition par année de récolte

Le tableau VI donne les moyennes et leurs variations des concentrations des composés chimiques au cours des deux années 2006 et 2007. Une comparaison de moyenne est aussi effectuée à l'aide du test de Student au seuil de risque 5%.

Tableau VI
Composition moyenne du café vert « Bourbon Pointu », en % MS pour les deux années de récolte.

Composés	Année 2006	Année 2007	Test de Student ($P \leq 0,05$)
saccharose	7,36 ± 0,58	6,80 ± 0,62	s
glucose	0,05 ± 0,02	0,03 ± 0,02	s
fructose	0,03 ± 0,03	0,02 ± 0,03	ns
trigonelline	1,34 ± 0,08	1,33 ± 0,08	ns
caféine	0,75 ± 0,02	0,75 ± 0,02	ns
acide caféique	0,01 ± 0,001	0,01 ± 0,001	ns
Σ acides chloro.	6,73 ± 0,55	6,97 ± 0,54	S
3-CQA	0,30 ± 0,04	0,29 ± 0,04	S
4-CQA	0,48 ± 0,10	0,47 ± 0,09	ns
5-CQA	4,63 ± 0,44	4,81 ± 0,40	s
5-FQA	0,34 ± 0,07	0,37 ± 0,06	ns
3,4-diCQA	0,14 ± 0,04	0,14 ± 0,03	ns
3,5-diCQA	0,57 ± 0,57	0,64 ± 0,09	S
4,5-diCQA	0,24 ± 0,06	0,22 ± 0,06	S
acides gras totaux	14,32 ± 0,58	14,50 ± 0,75	ns
C16:0	4,99 ± 0,23	5,05 ± 0,30	ns
C18:0	1,00 ± 0,09	1,03 ± 0,08	s
C18:1 n-9	1,02 ± 0,15	1,07 ± 0,13	s
C18:2 cc	6,40 ± 0,38	6,50 ± 0,52	ns
C20:0	0,34 ± 0,03	0,34 ± 0,02	ns
C18:3 n-3	0,27 ± 0,02	0,27 ± 0,02	ns

Des différences significatives sont observées entre 2006 et 2007 pour les moyennes en concentration de deux acides gras C18:0 et C18:1 n-9, pour le saccharose et le glucose, pour la somme des acides chlorogéniques et pour cinq isomères 3-CQA, 5-CQA, 5-FQA, 3,5-diCQA et 4,5-diCQA.

En effet, les cafés de l'année 2006 ont des teneurs en saccharose, en glucose, en acides chlorogéniques totaux, 3-CQA et 4,5-diCQA plus élevées que ceux de 2007. Les cafés de la récolte 2007 ont des concentrations plus importantes en C18:0, C18:1 n-9, 5-CQA, 5-FQA et 3,5-diCQA. Par conséquent, l'année de récolte a une légère influence sur la concentration de certains composés dans le café vert « Bourbon pointu ». Cependant, il est nécessaire de vérifier l'impact des facteurs environnementaux sur la variabilité annuelle de la composition chimique du café vert [20, 54].

1.3.2. Influence des paramètres pédoclimatiques entre les deux années de récolte

Il existe une étroite corrélation entre l'origine géographique du café et la composition biochimique des grains de café verts. Or, l'origine géographique est fortement liée aux paramètres géoclimatiques qui peuvent être différents d'une aire de culture à une autre et éventuellement d'une année sur l'autre.

1.3.2.1. Au niveau de la zone de l'île entre les deux années

Les résultats portant sur les variations des teneurs des composés biochimiques du café vert par zone entre les deux années sont représentés sur les figures 7 et 8. Rappelons que notre échantillonnage s'est étalé sur trois zones de récoltes, la zone N : Nord ; la zone C : Centre et la zone S : Sud.

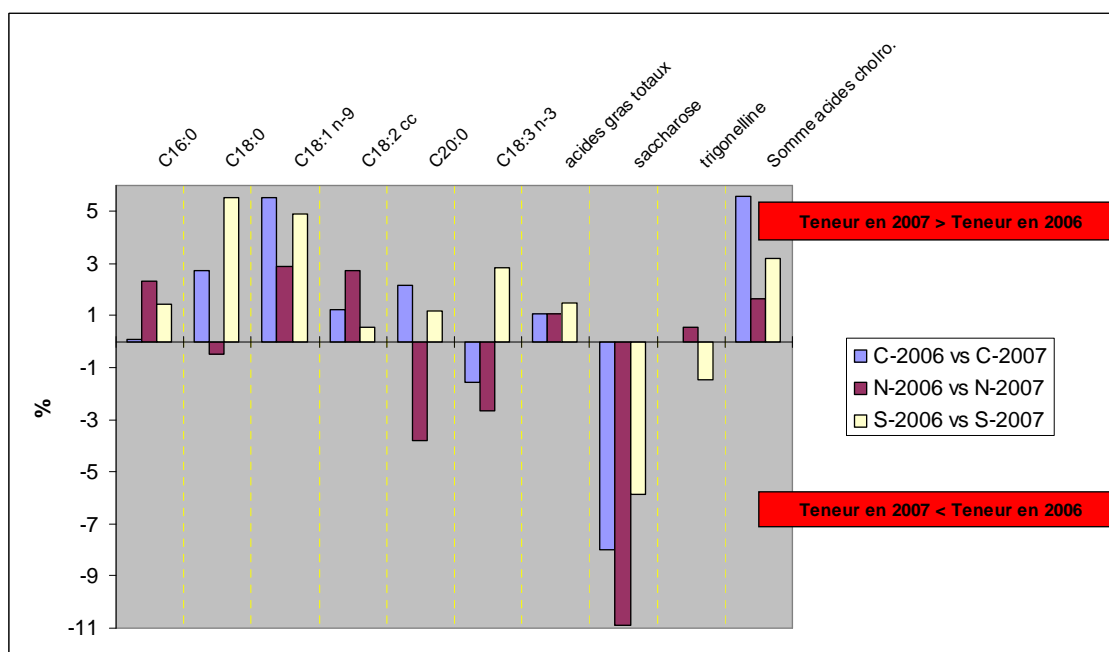


Figure 7 : Variations en pourcentage de la teneur des acides gras, de la somme des acides gras, du saccharose, de la trigonelline et de la somme des acides chlorogéniques entre les deux années de récolte 2006 et 2007 pour les trois zones de productions C (Centre), N (Nord), S (Sud).

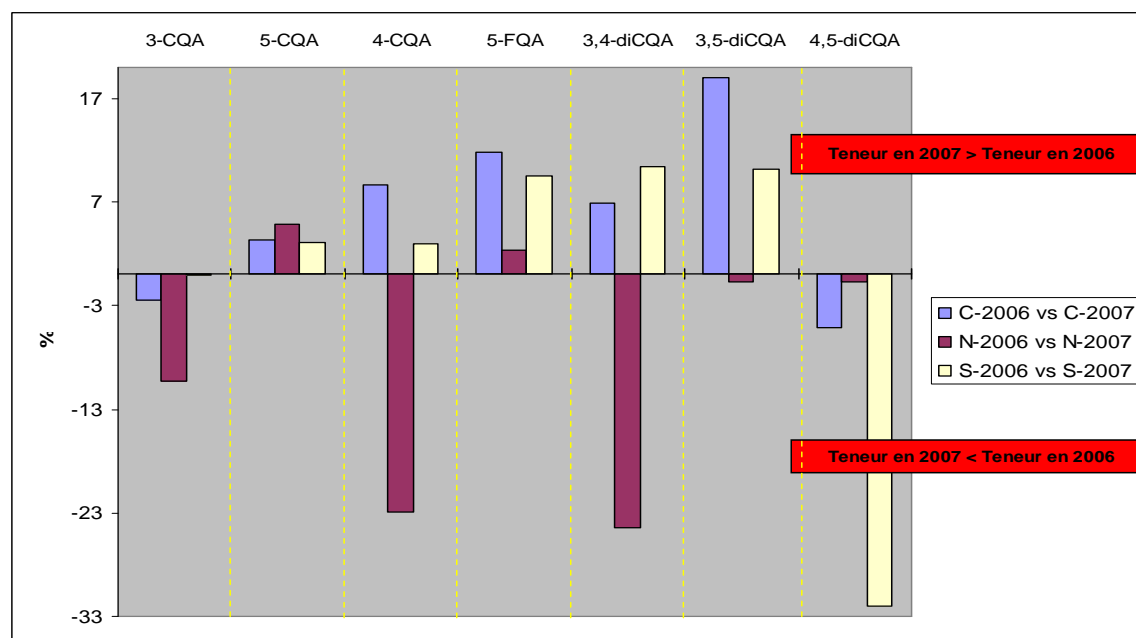


Figure 8 : Variations en pourcentage de la teneur des isomères de l'acide chlorogénique entre les deux années de récolte 2006 et 2007 pour les trois zones de productions C (Centre), N (Nord), S (Sud).

Au regard des résultats, les cafés issus de la zones C récoltés en 2006 ont des teneurs plus élevées en C18:3 n-3, en saccharose, en 4,5-diCQA et 3-CQA que ceux de la zone C récoltés en 2007. Ces derniers ont des concentrations plus élevées pour tous les autres composés par rapport à ceux de la zone C de 2006. Cependant, seules les concentrations du **saccharose** et de la concentration totale en acides chlorogéniques, des isomères **4-CQA**, **5-FQA** et **3,5-diCQA** sont significativement différentes au seuil de risque 5% selon le test de Student entre ces deux paramètres.

Les cafés issus de la zone N de 2006 ont des concentrations plus élevées en C18:0, C20:0, C18:3 n-3, saccharose, 3-CQA, 4-CQA, 3,4-diCQA, 3,5-diCQA, 4,5-diCQA que les cafés de la zone N récoltés en 2007. Ces derniers ont des concentrations plus élevées pour les autres composés par rapport à ceux de la zone N de 2006. Cependant, seules les concentrations du **saccharose**, des isomères **3-CQA**, **4-CQA**, **5-CQA** et **3,4-diCQA** sont significativement différentes au seuil de risque 5% selon le test de Student.

Les cafés issus de la zone S de 2006 ont des teneurs plus élevées en saccharose, trigonelline et 4,5-diCQA que les cafés de la zone S récoltés en 2007. Ces derniers ont des concentrations plus élevées pour les autres composés par rapport à ceux de la zone S de 2006. Cependant, seules les concentrations **C18:0**, **C18:3 n-3**, les isomères **5-FQA**, **3,4-diCQA**, **3,5-diCQA** et **4,5-diCQA** sont significativement différentes au seuil de risque 5%.

Par conséquent, les critères de différenciation à la fois entre des années et des zones de récolte seront les composés significativement différents entre les deux années et non ceux communs aux trois zones soient le composé 5-FQA pour la zone C, les composés 3-CQA et 5-CQA pour la zone N et les acides gras C18:0 et C18:3 n-3 pour la zone S.

1.3.2.2. Au niveau de la classe d'altitude entre les deux années

Les résultats portant sur les variations des teneurs des composés biochimiques du café vert par classe d'altitude entre les deux années sont représentés sur les figures 9 et 10. Rappelons que l'échantillonnage s'est étalé sur trois classes d'altitude, altitude 1 : < 1000 m ; Altitude 2 : < 850 m ; altitude 3 : < 650 m.

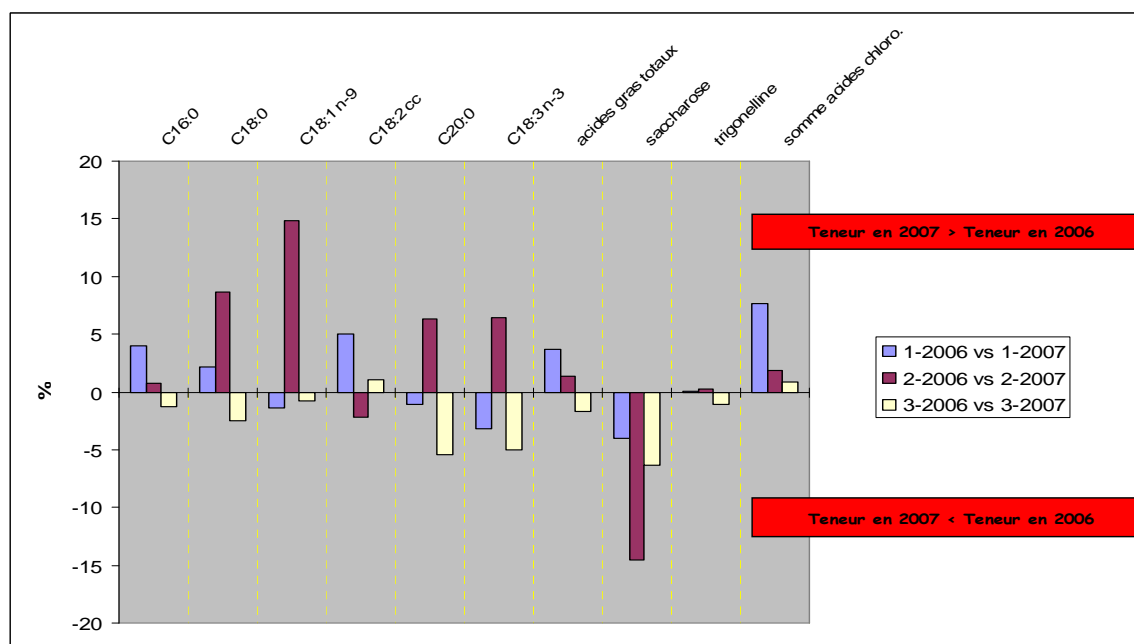


Figure 9 : Variations en pourcentage de la teneur des acides gras, de la somme des acides gras, du saccharose, de la trigonelline et de la somme des acides chlorogéniques entre les deux années de récolte 2006 et 2007 pour les trois classes d'altitude, 1 (<1000m), 2 (<850m), 3 (<650m).

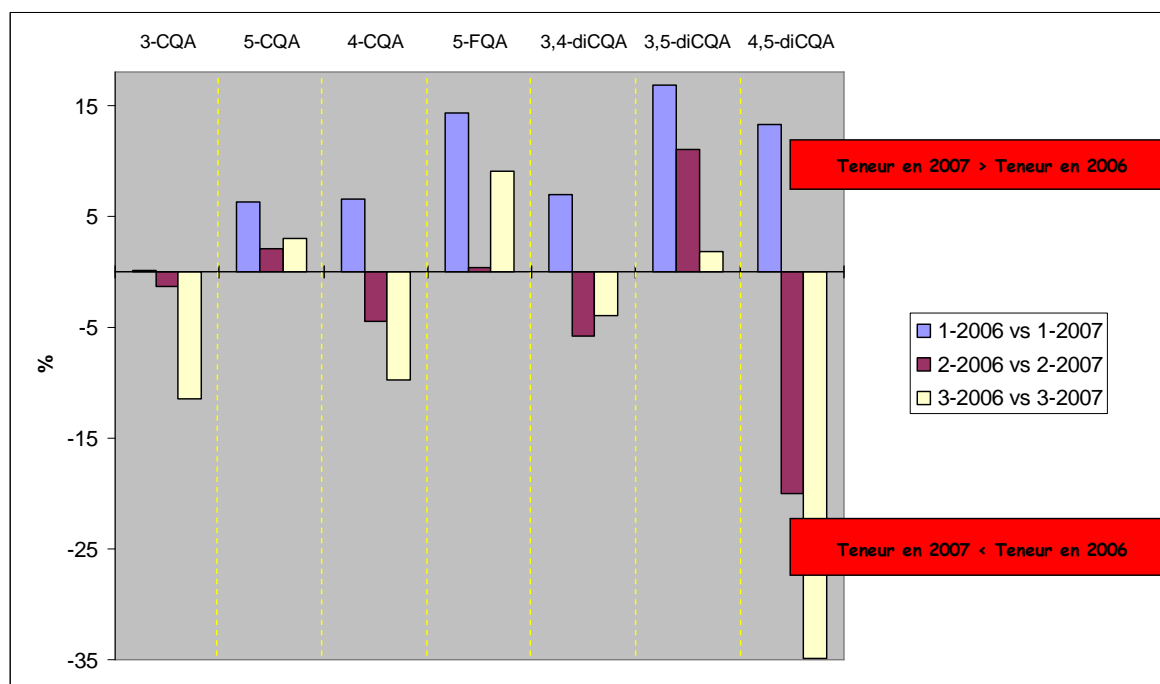


Figure 10 : Variations en pourcentage de la teneur des isomères de l'acide chlorogénique entre les deux années de récolte 2006 et 2007 pour les trois classes d'altitude, 1 (<1000m), 2 (<850m), 3 (<650m).

Au regard des résultats, les cafés issus de la classe d'altitude 1 récoltés en 2006 ont des teneurs plus élevées en C18:1 n-9, C20:0, C18:3 n-3 et en saccharose que les cafés de la même classe d'altitude récoltés en 2007. Ces derniers ont des concentrations plus élevées pour tous les autres composés en particulier pour tous les acides chlorogéniques. Cependant, seules les concentrations **en acides gras totaux**, en **C16:0**, **C18:3 n-3**, **C18:2 cc**, en **saccharose**, en **acides chlorogéniques totaux** et en isomères **5-CQA**, **5-FQA**, **3,5-diCQA**, **4,5-diCQA** sont significativement différentes au seuil de risque 5% selon le test de Student.

Les cafés issus de la classe d'altitude 2 récoltés en 2006 ont des teneurs plus élevées en C18:2 cc, en saccharose, en 3-CQA, 4-CQA, 3,4-diCQA, 4,5-diCQA que les cafés de la même classe d'altitude récoltés en 2007. Ces derniers ont des concentrations plus élevées pour tous les autres composés. Cependant, seules les concentrations du **saccharose**, du **C18:1 n-9**, **C20:0**, **C18:3 n-3**, **C18:2 cc**, **C18:0** et des isomères **3,5-diCQA**, **4,5-diCQA** sont significativement différentes au seuil de risque 5% selon le test de Student.

Les cafés issus de la classe d'altitude 3 récoltés en 2006 ont des teneurs plus élevées en C16:0, C18:0, C18:1 n-9, C20:0, C18:3 n-3, en saccharose, en trigonelline et en acides gras totaux que les cafés de la même classe d'altitude récoltés en 2007. Ces derniers ont des concentrations plus élevées pour tous les autres composés. Cependant, seules les concentrations **en acides gras totaux**, **C20:0**, **C18:3 n-3**, en **saccharose**, des isomères **3-CQA**, **4-CQA**, **4,5-diCQA**, **5-FQA** sont significativement différentes au seuil de risque 5%.

Par conséquent, les critères de différenciation à la fois entre des années et des classes d'altitude seront les composés significativement différents entre les deux années de récolte et non communs aux 3 classes d'altitude, soient la somme des acides chlorogéniques, les composés 5-CQA et C16:0 pour la classe d'altitude 1, les composés C18:1 n-9 et C18:0 pour la classe d'altitude 2 et les composés 3-CQA et 4-CQA ainsi que la somme des acides gras pour la classe d'altitude 3.

1.3.2.3. Au niveau du type de transformation post-récolte entre les deux années

Les résultats portant sur les variations des teneurs des composés biochimiques du café vert par type de transformation post-récolte entre les deux années sont représentés sur les figures 6 et 7. Rappelons que l'échantillonnage est composé de cafés ayant subi quatre variantes du traitement post-récolte par voie humide, les traitements A, C, E, G.

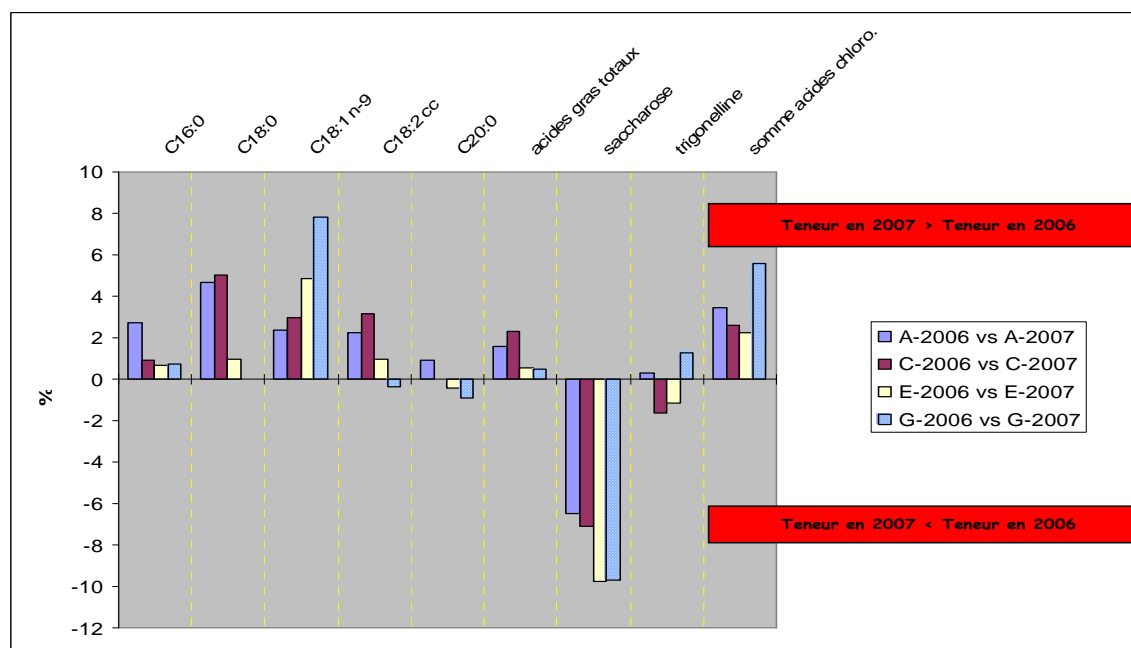


Figure 11 : Variations en pourcentage de la teneur des acides gras, de la somme des acides gras, du saccharose, de la trigonelline et de la somme des acides chlorogéniques entre les deux années de récolte 2006 et 2007 pour les quatre variantes du traitement post-récolte par voie humide, A, C, E, G.

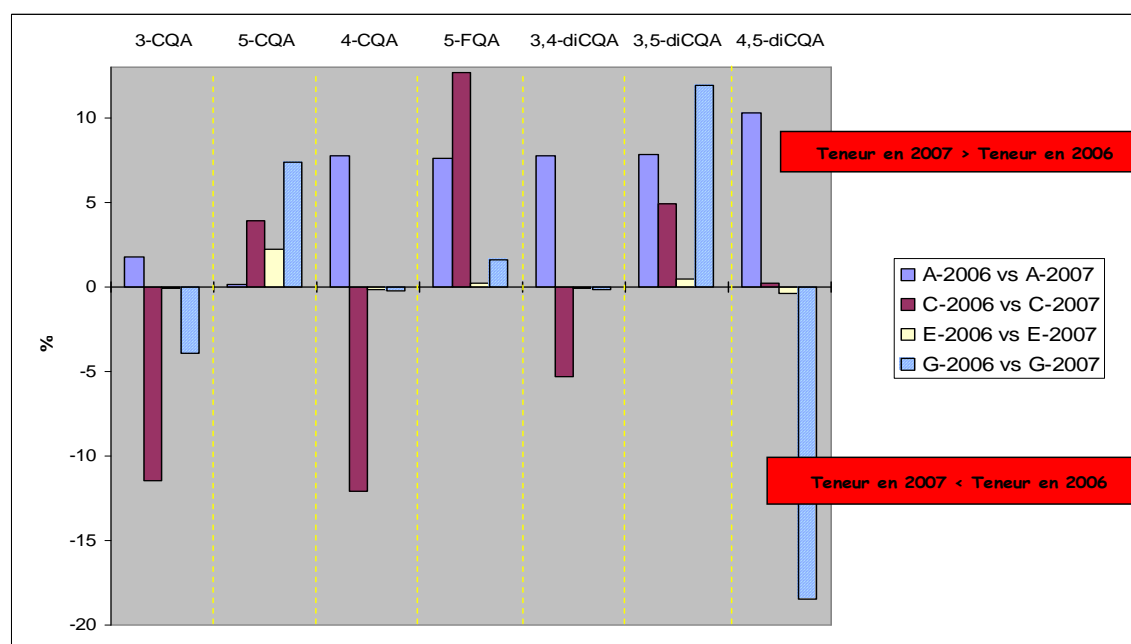


Figure 12 : Variations en pourcentage de la teneur des isomères de l'acide chlorogénique entre les deux années de récolte 2006 et 2007 pour les quatre variantes du traitement post-récolte par voie humide, A, C, E, G.

Au regard des résultats, les cafés issus de la transformation post-récolte A récoltés en 2006 ont des teneurs plus élevées en saccharose que les cafés issus de la même transformation de la récolte 2007. Ces derniers ont des concentrations plus élevées pour tous les composés autres que le saccharose. Cependant, seule la concentration en **saccharose** est significativement différente au seuil de risque 5% selon le test de Student.

Les cafés issus de la transformation post-récolte C récoltés en 2006 ont des teneurs plus élevées en saccharose, en trigonelline, en isomères 3-CQA, 4-CQA, 3,4-diCQA que les cafés issus de la même transformation récoltés en 2007. Ces derniers ont des concentrations plus élevées pour tous les autres composés. Cependant, seule la concentration en **saccharose**, **C18:0**, et en isomères **3-CQA**, **4-CQA** et **5-FQA** sont significativement différentes au seuil de risque 5%.

Les cafés issus de la transformation post-récolte E récoltés en 2006 ont des teneurs plus élevées en saccharose, trigonelline, C20:0, en isomères 3-CQA, 4-CQA, 3,4-diCQA et 4,5-diCQA que les cafés issus de la même transformation récoltés en 2007. Ces derniers ont des concentrations plus élevées pour tous les autres composés. Cependant, seule la concentration en **saccharose** et en isomères **5-FQA**, **3,5-diCQA** et **4,5-diCQA** sont significativement différentes au seuil de risque 5%.

Les cafés issus de la transformation post-récolte G récoltés en 2006 ont des teneurs plus élevées en saccharose, C18:2 cc, C20:0, en isomères 3-CQA, 4-CQA, 3,4-diCQA et 4,5-diCQA que les cafés issus de la même transformation récoltés en 2007. Ces derniers ont des concentrations plus élevées pour tous les autres composés. Cependant, seule la concentration en **saccharose**, **C18:1 n-9**, en **acides chlorogéniques totaux** et les isomères **5-CQA**, **3,5-diCQA** et **4,5-diCQA** sont significativement différentes au seuil de risque 5%.

Par conséquent, les critères de différenciation à la fois entre des années et types de transformations post-récolte seront les composés significativement différents entre les deux années de récolte et non communs aux 4 types de transformations post-récolte soient les composés 3-CQA, 4-CQA et C18:0 pour le traitement C, les composés C18:1 n-9, 5-CQA et la somme des acides chlorogéniques pour le traitement G. Par contre, aucune molécule ou classe de composés ne permettent de différencier les traitements A et E entre les deux années de récolte.

1.3.3. Le paramètre pédoclimatique prépondérant

A ce stade, il était important de déterminer le paramètre le plus influent sur la composition des échantillons de café vert « Bourbon Pointu » issus de ces terroirs différents avec les deux années de récoltes confondues. Pour cela, une analyse en Analyse Factorielle Discriminante a été réalisée sur l'ensemble des échantillons. Les variables qualitatives sont les échantillons identifiés par leur regroupement Zone-Altitude-Transformation, c'est-à-dire que chaque échantillon a un regroupement qui lui est propre, par exemple, l'échantillon α qui est dans la zone C, à l'altitude 1 et ayant subi une transformation A, est représenté par le regroupement C1A.

Un total de 6 échantillons est représenté par le même regroupement car leurs paramètres pédoclimatiques (zone, altitude, type de transformation) sont identiques donc pour 216 échantillons, on a 36 regroupements différents.

Les variables quantitatives sont les moyennes des concentrations de chaque composé biochimique. Le tableau VII donne la contribution des différentes variables aux deux composantes F1 et F2.

Tableau VII
Contribution des différentes variables aux deux composantes F1 et F2 de l'AFD réalisée sur les échantillons de café vert « Bourbon Pointu ».

Composé	F1	F2
saccharose	-0,253	0,226
glucose	-0,070	-0,068
fructose	-0,147	0,191
trigonelline	0,829	-0,398
caféine	0,235	0,697
acide caféique	-0,084	-0,116
Σ acides chloro	0,101	0,130
3-CQA	0,359	0,220
4-CQA	0,329	-0,189
5-CQA	-0,069	0,135
5-FQA	0,152	0,160
3,4-diCQA	0,415	0,027
3,5-diCQA	0,181	-0,132
4,5-diCQA	-0,095	0,408
acides gras totaux	-0,476	-0,290
C16:0	-0,660	-0,134
C18:0	0,523	-0,362
C18:1 n-9	0,729	-0,199
C18:2 cc	-0,719	-0,160
C20:0	0,706	-0,230
C18:3 n-3	-0,195	-0,120

L'axe F1 est corrélé positivement avec la trigonelline, les acides gras C18:1 n-9, C20:0 et négativement avec les deux acides gras, C16:0 et C18:2 cc alors que l'axe F2 est corrélé positivement avec la caféine.

La représentation graphique des échantillons dans le plan 1,2 (figure 13) montre une discrimination complète des échantillons en fonction de la classe d'altitude avec en plus une discrimination dans des zones à l'altitude 2.

Les deux autres zones ainsi que les quatre transformations post-récoltes ne sont pas discriminées, elles n'ont aucune influence sur la composition biochimique du café vert « Bourbon pointu ». Ce résultat est confirmé par l'ANOVA réalisée sur les paramètres pédoclimatiques des deux années confondues comme nous le montre le tableau VIII.

En effet, aucune différence significative en concentrations de composés verts n'est observée entre les quatre transformations ni entre les trois zones pour les deux années confondues alors que la zone N est discriminée des deux autres zones par la concentration plus élevée en caféine.

Tableau VIII

Différences significatives des teneurs en caféine, C18:1 n-9, C16:0, C20:0 et trigonelline au seuil de risque 5% entre les trois classes d'altitude et entre la zone N et les zones C et S.

	caféine	C18:1 n-9	C16:0	C20:0	trigonelline
N vs (C,S)	s	ns	ns	ns	ns
1 vs 2 vs 3	s	s	s	s	s

Au niveau de l'axe F1, les trois classes d'altitudes sont nettement discriminées. Les cafés issus de la classe d'altitude 3 ont des teneurs plus élevées en trigonelline, les acides gras C18:1 n-9 et C20:0 que les autres cafés, tandis que les cafés issus de la classe d'altitude 1 ont des teneurs plus élevées en acides gras C16:0 et C18:2 cc.

Les cafés issus de la classe d'altitude 2 des zones C et S se différencient des cafés issus de la zone N. En effet, ces derniers ont des concentrations en caféine plus élevées que les premiers.

Par conséquent, le facteur qui influence le plus la composition chimique du café vert « Bourbon Pointu » est la classe d'altitude. Cependant, en fonction du rapprochement des individus issus de la même zone mais d'altitudes différentes, il est plus judicieux de parler de paramètres climatiques et donc rapprocher le facteur altitude au paramètre climatique température ambiante.

Enfin, les acides gras qui sont connus pour participer à la discrimination entre Arabicas de différents terroirs [41, 55], participent ici avec la trigonelline à la discrimination des cafés « Bourbon Pointu » et sont par conséquent des marqueurs de localisation du café vert « Bourbon Pointu » à l'île de La Réunion.

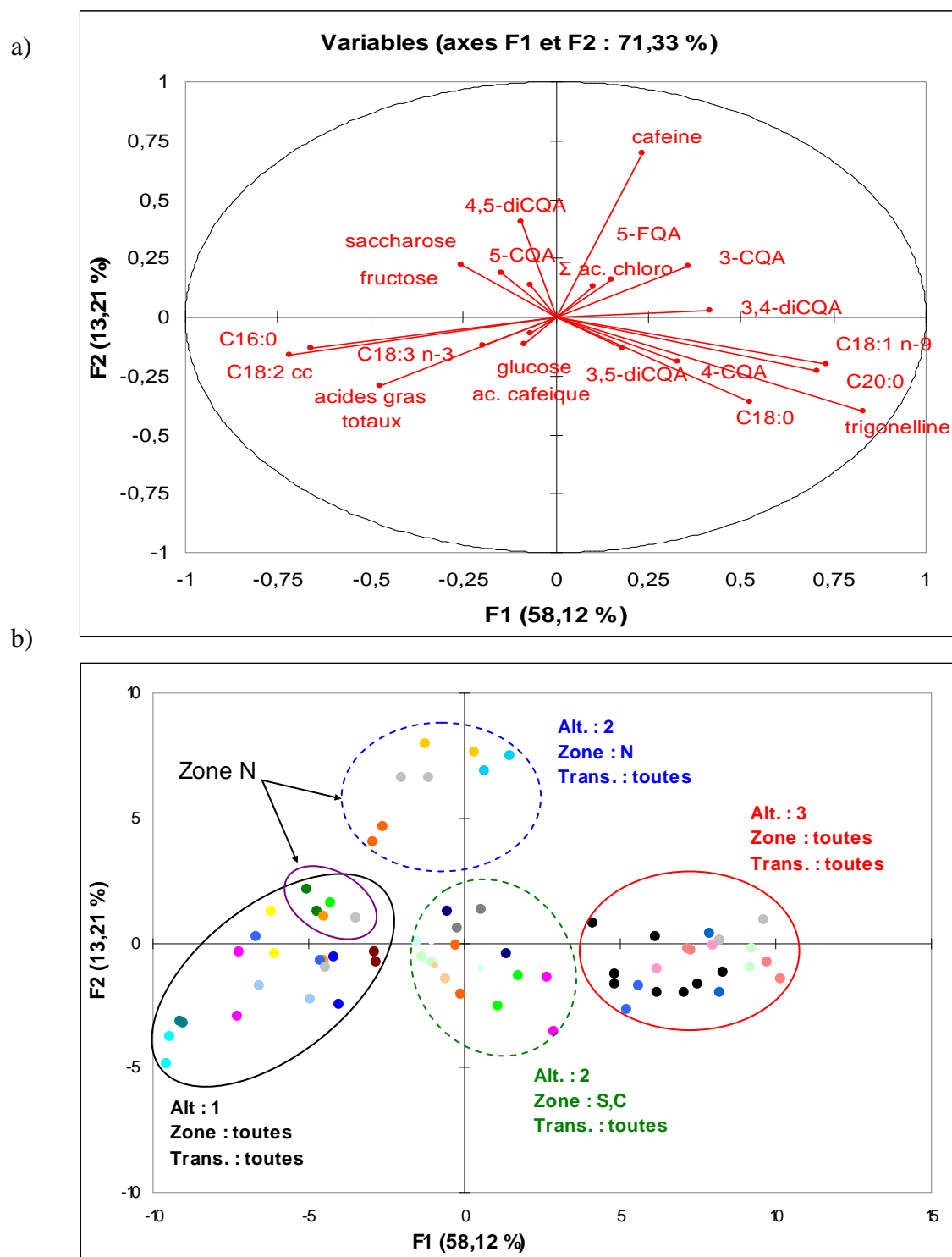


Figure 13 : Représentation graphique de l'analyse factorielle discriminante sur les échantillons du café vert « Bourbon Pointu ».

- Représentation de la construction des axes 1, 2 et visualisation des vecteurs propres de l'AFD.
- Répartition des individus du café « Bourbon Pointu » sur l'axe 1, 2 de l'AFD.

2 - Etude du café torréfié

2.1. La torréfaction

Le processus de torréfaction consiste à griller le grain vert sous l'effet du couple associant un gradient de température et le temps de torréfaction. La combinaison température/temps conduit à divers degrés de torréfaction allant du "light" au "dark" en passant par le "medium". Le choix du degré de torréfaction est fonction de l'espèce de café et de la forme du grain [56]. C'est au cours de la torréfaction que le café subit des changements importants au niveau de sa structure, de sa composition chimique et développe toutes ses propriétés organoleptiques [57, 58]

Physiquement, le grain change de couleur, il passe du vert au marron. En moyenne, le grain double de volume, perd jusqu'à 20% en poids et sa densité peut diminuer jusqu'à 300 kg/m³ [59, 60]. Les températures de torréfaction influencent aussi bien le volume que la taille des micropores du café grillé [61].

Chimiquement, la torréfaction est le siège de réactions de brunissement non enzymatiques. Les réactions de dégradation d'origine thermique sont à l'origine de ce brunissement. La plus commune est la réaction de Maillard qui est initialisée par la combinaison entre un sucre réducteur et un acide aminé. Elle conduit essentiellement à la formation des hétérocycles et de composés volatils mais participe aussi à la formation de composés non volatils tels que les mélanoïdines [62, 63]. D'autres réactions de pyrolyse concernent d'autres classes de molécules. Le saccharose et les arabinogalactanes génèrent des composés furaniques du type 5-hydroxyméthylfurfural à partir de 240°C [64, 65, 66], les arabinogalactanes paraissant très sensibles à la torréfaction [67]. Les lipides tels les acides gras s'oxydent et génèrent des composés carbonylés de type aldéhydique. La pyrolyse de la trigonelline et des acides chlorogéniques conduisent à la formation de dérivés pyridiniques, d'acides caféique, quinique et d'acide férulique [68].

Traditionnellement, la torréfaction dure entre 8 et 15 minutes avec une plage de température allant de 150 à 250°C et le processus de torréfaction se divise en trois phases :

- *une phase de séchage* : pendant cette première phase, la température de l'air du torréfacteur est absorbée par le grain. A la fin de cette phase, l'humidité du grain diminue considérablement passant de 12,5% à environ 5% et le grain est de couleur jaunâtre.

- *une phase de grillage* : pendant cette deuxième phase, les constituants du café subissent diverses réactions chimiques. La libération du gaz carbonique issu de la pyrolyse

entraîne une augmentation du volume (entre 50-100%) des grains de café. A la fin de cette phase, le grain de café est de couleur marron clair.

- *une phase de refroidissement*: pendant cette troisième phase, la température du grain de café doit être refroidie rapidement par jet d'eau [69] pour éviter la poursuite de la torréfaction et la carbonisation des grains. Après cette dernière étape, il est de couleur marron et renferme toute sa richesse aromatique.

La figure 14 montre l'évolution de la température de l'air du torréfacteur, celle de la température interne du grain et du taux d'humidité dans le grain. Ce dernier élément étant un facteur important des réactions de Maillard.

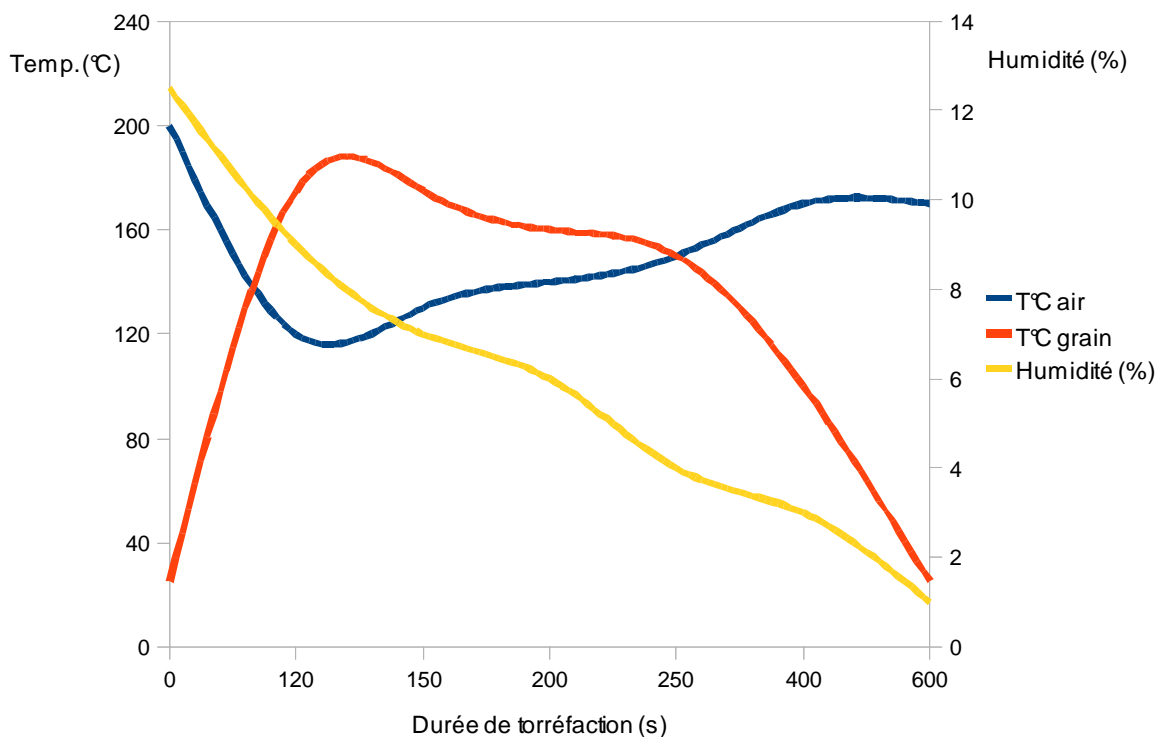


Figure 14: Evolution de la température de l'air et du grain (degrés Celsius) dans le torréfacteur et du taux d'humidité du grain (pourcentage) en fonction de la durée de la torréfaction (secondes).

2.1.1. Le profil de torréfaction

Le choix d'un gradient de température couplé à celui d'une durée de torréfaction conduit à la définition d'un profil de torréfaction. Les relations entre les profils de torréfaction et la qualité organoleptique ont fait l'objet aussi bien de publications que de brevets. Mendes *et al.*, (2001) [70] a mis en évidence une forte corrélation entre la qualité du Robusta brésilien en tasse et le degré de torréfaction. Mayer a montré que lorsqu'une torréfaction se rapproche du stade "dark", des composés comme les cétones ou les furanes voient leurs teneurs diminuer et inversement pour des composés comme les phénols ou les pyridines leurs concentrations augmentent [71]. La société Kraft Food, *via* ses deux brevets, [72, 73] suggère deux profils de torréfaction qui améliorent la flaveur de l'Arabica et accessoirement du Robusta par une plus grande teneur en extrait sec soluble dans le café en tasse. Les durées sont toutes inférieures à 15 minutes. Une durée de torréfaction de cinq minutes dans un courant d'air chaud à 250°C donne un produit de meilleure qualité selon Nagaraju *et al.*, (1997) [74] et une durée de moins de deux minutes sous une pression de 5 bars a été préconisée en 1998 par Clauzure [75] pour éviter l'apparition de benzopyrène. Ces brevets proposent un profil, soit montant, soit descendant. Le profil montant comprend deux étapes. Dans une première phase, dans un appareil de type PROBAT model G240, le flux d'air est de 385-496°C afin de porter les grains à une température de 149-210°C. Le temps de torréfaction est compris entre 7,5 et 11 minutes afin que les grains aient un indice de couleur de 35-45 Lu. La deuxième étape dure entre 1 à 3 minutes et consiste à porter la température des grains à 185-232°C. Après cette deuxième phase, les grains sont refroidis immédiatement par un spray d'eau froide ou par injection d'un courant d'air froid. Le profil descendant d'une durée de 14 minutes débute à 460°C et la température descend jusqu'à 198°C avant un refroidissement des grains dans des conditions identiques à celles du profil montant.

2.1.1.1. Mise en œuvre du profil de torréfaction du café « Bourbon Pointu »

Afin d'exprimer au mieux les qualités aromatiques du « Bourbon Pointu », quatre profils de torréfaction (figure 15) ont été mis en œuvre. Ces profils sont des torréfactions rapides et durent moins de huit minutes et la température de torréfaction est en deçà des températures appliquées couramment soit au maximum de 210°C. Un lot de café provenant

d'un seul caféiculteur pour les quatre profils de torréfaction a été utilisé et chaque profil de torréfaction a été répété trois fois. Les quatre profils de torréfaction sont les suivants :

Les profils 1 et 1+ sont des profils de torréfaction descendant avec une température de départ à 210°C suivi d'une descente en température pendant 180 secondes à 160°C et d'un isotherme à 160°C pendant environ 100 secondes pour le profil 1 ou pendant 160 secondes pour le profil 1+ avant refroidissement des grains.

Les profils 2 et 2+ sont les profils de torréfaction montant avec une température de départ de 150°C suivi d'une descente en température pendant 60 secondes à 120°C, suivi d'une isotherme à 120°C pendant 140 secondes et d'une remontée à 155°C effectuée en 80 secondes pour finir sur une deuxième isotherme à 155°C pendant environ 120 secondes pour le profil 2 ou de 160 secondes pour le profil 2+.

La représentation graphique des quatre profils est illustrée dans la figure 15.

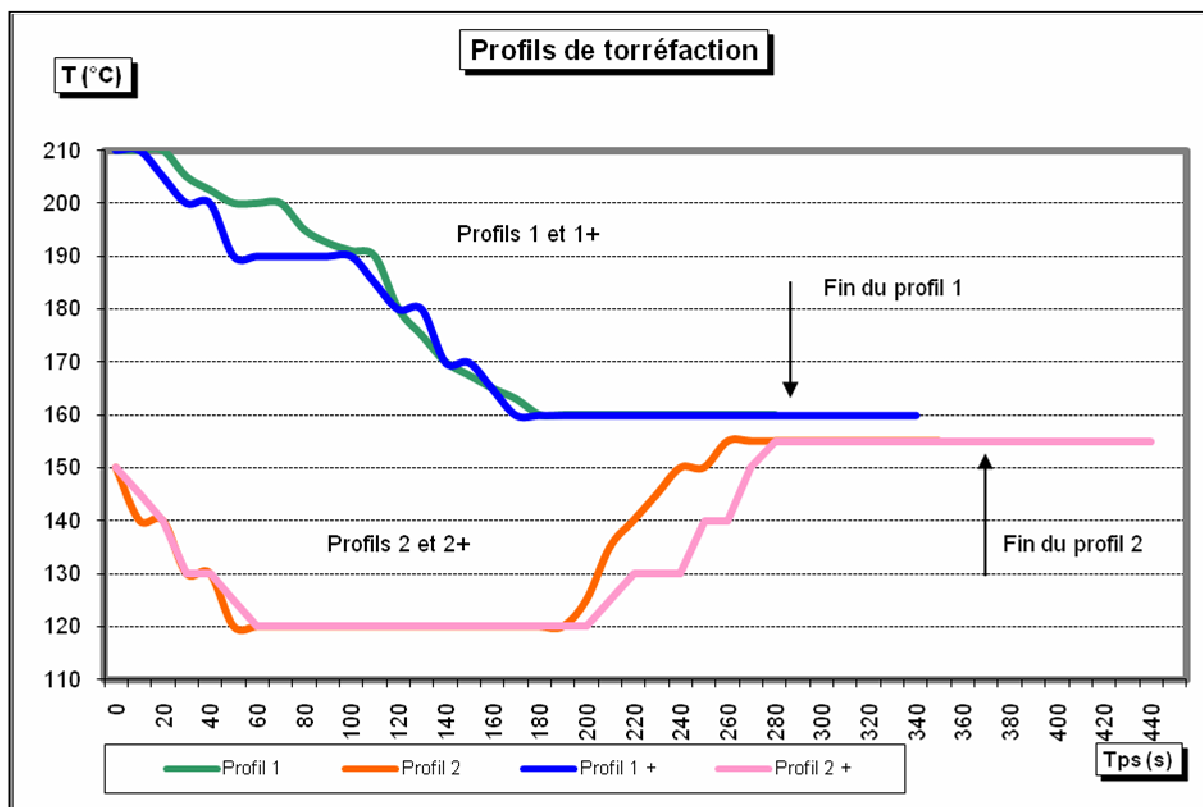


Figure 15 : Représentation des quatre profils de torréfaction 1, 1+, 2 et 2+ en fonction du couple Température (°C) ; Temps (s).

2.1.1.2. Analyse de la qualité gustative des cafés obtenus en fonction du profil de torréfaction

Les boissons obtenues à partir des douze cafés torréfiés selon les quatre profils de torréfaction ont été soumises à un panel d'experts (10 dégustateurs experts et chaque café a été goûté une fois) afin de sélectionner le profil adéquat du point de vue gustatif/olfactif. Les tableaux IX et X donnent les moyennes des notes obtenues pour les différents critères sensoriels ainsi que les résultats d'une comparaison inter-moyennes par le biais d'une analyse de variance.

Tableau IX

Moyenne des notes des analyses sensorielles des cafés issus des quatre profils de torréfaction.

Descripteur	T1	T1+	T2	T2+
persistance	2,3 ± 0,4	3,1 ± 0,6	1,7 ± 0,3	2,8 ± 0,5
fruité	2,2 ± 0,4	1,7 ± 0,3	0,9 ± 0,3	0,5 ± 0,3
préférence	3,8 ± 0,2	3,3 ± 0,2	2,2 ± 0,2	2,6 ± 0,2
fermenté	0,0	0,0	0,1 ± 0,3	0,3 ± 0,3
vert	0,1 ± 0,3	0,1 ± 0,3	0,5 ± 0,3	0,1 ± 0,3
qualité aromatique	3,3 ± 0,5	3,2 ± 0,4	2,7 ± 0,4	2,7 ± 0,5
corps	2,3 ± 0,4	2,7 ± 0,5	1,7 ± 0,3	2,5 ± 0,4
acide	2,9 ± 0,6	2,8 ± 0,5	2,3 ± 0,5	1,9 ± 0,3

Tableau X

Différences significatives des moyennes des notes des descripteurs sensoriels au seuil de risque 5% entre les quatre profils de torréfaction.

Anova ($P \leq 0,05$)	persistance	fruité	préférence	fermenté	vert	qual. Arôm.	corps	acide
T1 vs T2+	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Oui
T1 vs T2	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
T1 vs T1+	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non
T1+ vs T2+	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Oui
T2 vs T2+	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Oui
T2 vs T1+	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Oui

Au regard de l'analyse de variance, le profil T1 est globalement mieux noté que le profil T2 : les notes des descripteurs à connotation positive sont plus élevées et les notes des descripteurs à connotation négative (vert, fermenté) sont plus basses. Le profil T1 est significativement différent du profil T2 au seuil de risque 5% pour les descripteurs : préférence, acidité, fruité et qualité aromatique.

Les moyennes des descripteurs des profils T1 et T2 par rapport à leurs profils de durée de torréfaction plus longue respectivement, T1+ et T2+ sont significativement différentes au seuil de risque 5%, pour les descripteurs « persistance », « fruité », « préférence » et « corps ». Une durée de torréfaction moins longue améliore le caractère fruité, diminue la persistance aromatique et le corps en maintenant constant la qualité aromatique.

Une torréfaction inférieure à 300 secondes et à une température conséquente supérieure au moins à 150°C semblent être des seuils favorables à l'expression de la qualité aromatique. En effet, Czerny *et al.*, (1999) [76] ont trouvé que des odeurs de terre et de fumée augmentent avec le degré de torréfaction. Akiyama *et al.*, (2008) [77] ont indiqué que des odeurs phénolique, de caramel, de fumée sont corrélées positivement avec le degré de torréfaction et négativement avec des notes douces, fruitées et acidulées.

Une analyse factorielle discriminante a été réalisée afin d'établir des corrélations entre les descripteurs et les quatre profils de torréfaction. Quatre groupes correspondent aux quatre profils composés chacun de trois individus ont été pré-définis et les moyennes des notes de chaque descripteur de chaque groupe sont considérés comme des variables quantitatives. Deux axes représentant plus de 95% d'information ont été retenus. Les valeurs propres de ces deux axes F1 et F2 sont consignées dans le tableau XI.

Tableau XI
Valeurs propres de l'AFD réalisée sur les échantillons de café torréfié « Bourbon pointu »
issus des quatre profils de torréfaction.

	F1	F2
Valeur propre	188,3	38,7
Discrimination (%)	80,8	16,6
% cumulé	80,8	97,3

Tableau XII
Contribution des différentes variables de l'AFD réalisée sur les échantillons de café torréfié
« Bourbon Pointu » issus des quatre profils de torréfaction.

Descripteur	F1	F2
qual. arôme	-0,504	0,349
corps	-0,217	0,900
acide	-0,488	0,643
fruité	-0,840	0,499
persistance	0,048	0,928
préférence	-0,744	0,490
vert	0,100	-0,976
fermenté	0,766	0,132

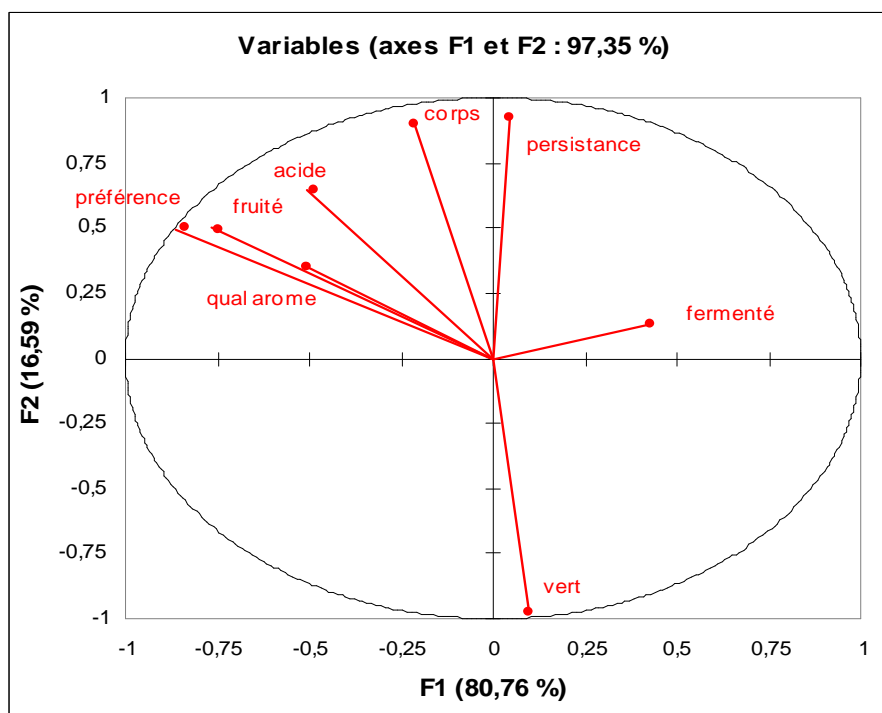
Les résultats de l'AFD montrent que 100 % des échantillons se sont bien classés. Le tableau XII indique que l'axe F1 est corrélé positivement avec le descripteur fermenté et négativement avec les descripteurs préférence et fruité tandis que l'axe F2 est corrélé positivement avec les descripteurs corps et persistance et négativement avec le descripteur vert. Il est également possible de constater que la préférence est associée au caractère fruité alors que la persistance est associée au corps. La représentation graphique des individus dans le plan 1,2 (figure 16) montre quatre groupes homogènes bien distincts correspondant aux quatre profils de torréfaction.

Sur l'axe F1, le profil T1 est nettement discriminé des trois autres et il engendre des cafés qui ont les meilleures notes en terme de préférence, de fruité, de qualité aromatique voire d'acidité alors que les cafés issus du profil de torréfaction T2+ sont caractérisés par la note fermenté.

L'axe F2 montre que les cafés issus des profils T1+ et T2 ont respectivement des caractères d'une part de corps et de persistance et d'autre part de vert en bouche marqué.

L'analyse de ces observations montre que le profil de torréfaction T1 convient le mieux et s'applique à tous les échantillons de café.

a)



b)

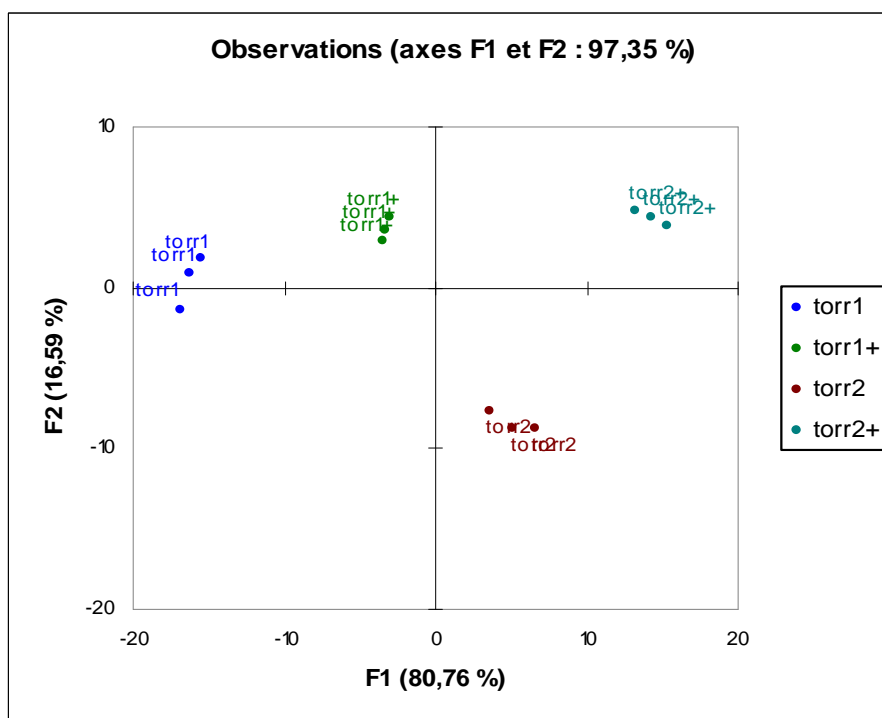


Figure 16: Représentation graphique de l'analyse factorielle discriminante sur les échantillons de café torréfié « Bourbon Pointu » issus des quatre profils de torréfaction.

- Représentation de la construction des axes 1, 2 et visualisation des vecteurs propres de l'AFD.
- Répartition des individus du café « Bourbon Pointu » sur l'axe 1, 2 de l'AFD.

2.2. La composition volatile du café torréfié

Comparativement à l'arôme du café vert dans lequel sont recensés environ 300 composés volatils [78, 79], la composition volatile du café torréfié comprend plus de 1000 molécules. Nombre de ces composés sont générés lors de la torréfaction à partir de précurseurs biochimiques présents dans le café vert et diffèrent aussi bien du point de vue de leur structure chimique, de leur concentration que de leur seuil de perception olfactif. L'étude du profil aromatique des cafés en poudre ou en boisson permet de différencier les cafés selon leur variété Arabica ou Robusta [80-83], de différencier le type de transformation post-récolte ou le degré de torréfaction [84]. Une démarche similaire est adoptée au cours de cette étude de la fraction volatile des cafés en poudre et de celle retrouvée dans les cafés en tasse afin de mesurer l'influence des effets de terroirs ou de traitements post-récolte sur la composition aromatique

2.2.1. Fraction aromatique du café « Bourbon Pointu » torréfié en poudre

2.2.1.1. Méthodologie utilisée

L'analyse des molécules volatiles comprend trois étapes : l'extraction des arômes de la matrice, la concentration de l'extrait, la séparation et l'identification des molécules présentes dans l'extrait. La principale difficulté réside dans l'obtention d'un extrait représentatif de l'image olfactive du produit. Les techniques classiques d'extraction de type Likens-Nickerson faisant intervenir un procédé thermique ou encore l'extraction directe par un solvant restent couramment utilisées malgré les risques de contamination de l'extrait par des molécules exogènes à la matrice générées par voie thermique ou apportées par le solvant. L'analyse des molécules de l'espace de tête par piégeage sur un adsorbant suivi d'une désorption thermique ou par solvant est aussi possible. Néanmoins, ces méthodes sont, soit relativement longues, soit coûteuses, soit ne sont pas facilement transportables.

La technique de micro-extraction sur phase solide (SPME), développée en 1990 par Pawliszyn *et al.* [85], est depuis très largement utilisée pour l'extraction et la pré-concentration de nombreux composés d'une large gamme de produits (identification de pesticides dans les eaux [86], étude des additifs de tabac [87]). Dans la recherche des composés volatils en SPME, les fruits et végétaux ou les matières solides du type sucre, riz et

café, ont constitué au tout début un terrain de prédilection [88-90]. Le succès de cette technique s'explique par son faible coût, sa simplicité d'utilisation, son transport facile et l'absence d'emploi de solvants organiques qui n'induit aucun artéfact dû à la préparation de l'échantillon.

Le principe de la SPME repose sur l'absorption ou l'adsorption des composés sur une phase de polymère fixée sur une fibre en silice fondue. Cette adsorption ou absorption est régie par un équilibre de phase. A l'équilibre, la quantité de chaque composé volatil présent dans l'échantillon initialement est distribuée dans les trois phases présentes : l'échantillon (liquide/solide), l'espace de tête (gaz) et la fibre. La distribution étant régie par les constantes d'équilibre entre ces différentes phases, le transfert de matière entre ces différentes phases se produit par diffusion à travers une fine et stagnante pellicule à la surface du fluide. Les différences de concentration à travers ces pellicules sont les forces motrices induisant la diffusion. Ce transfert cesse quand l'équilibre est atteint.

La connaissance de l'épaisseur de la fibre ainsi que celle du plus faible coefficient de diffusion des composés extraits permet de calculer le temps minimum pour atteindre l'équilibre.

Les composés retenus sur le polymère sont désorbés de la fibre SPME par désorption thermique dans le système d'injection d'un appareil de chromatographie en phase gazeuse. Au cours de l'étude de la fraction volatile des poudres de café torréfiés, la technique SPME a été privilégiée.

2.2.1.2. Composition aromatique du café torréfié en poudre

Après optimisation de la technique de piégeage en SPME (2 grammes de café en poudre ; phase d'équilibre : 50°C pendant 10 minutes ; phase d'adsorption : 50°C pendant 45 minutes), les composés volatils ont été séparés sur une colonne polaire (DB-WAX) et une colonne apolaire (SPB-5) à l'aide de la chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse. Ils ont été identifiés par comparaison d'une part, des spectres de masse obtenus à ceux des banques de données et d'autre part, des indices de rétention relatifs calculés à ceux théoriques. Le tableau XIII est une liste exhaustive de 146 composés identifiés répartis en 17 classes chimiques, issus des 216 échantillons.

Tableau XIII

Liste des molécules identifiées dans le café torréfié en poudre, sur colonne polaire et apolaire pour les deux années de récolte avec les indices de rétention relatifs calculés et théoriques respectifs.

Classe	Nom des composés	I.R.R. polaire		I.R.R. apolaire	
		<i>calculé</i>	<i>théorique</i>	<i>calculé</i>	<i>théorique</i>
acides	acide 2-méthylbutanoïque (<i>t</i>)	-	-	904	884
	acide acétique	1441	1434	623	600
	acide benzoïque (<i>t</i>)	2420	2400	-	-
	acide isovalérique	1685	1686	901	876
	acide nonanoïque (<i>t</i>)	-	-	1268	1265
	acide sénécioïque (<i>t</i>)	1789	1804	935	-
alcanes	hexane	600	600	600	600
alcools	éthanol (<i>t</i>)	932	913	-	-
	hexan-1-ol (<i>t</i>)	1366	1312	-	-
	cis-linalol oxide	1431	1423	1076	1074
	linalol	1563	1565	1102	1101
	terpinéol (<i>t</i>)	1693	1688	-	-
aldéhydes	2-méthylbut-2-énal	1083	1090	740	715
	2-méthylbutanal	910	880	659	653
	2-phénylbut-2-énal (<i>t</i>)	1912	1907	-	-
	2-phénylacétaldéhyde	1624	1609	1045	1049
	acétaldéhyde (<i>t</i>)	704	714	-	-
	benzaldéhyde	1511	1525	962	961
	(<i>E</i>)-but-2-énal (<i>t</i>)	1030	1034	-	-
	décanal (<i>t</i>)	-	-	1218	1211
	hexanal (<i>t</i>)	1073	1067	-	-
	2-méthylpropanal	810	817	558	558
	3-méthylbutanal	913	912	649	652
	propanal (<i>t</i>)	794	801	-	-
	vanilline (<i>t</i>)	-	-	1396	1391
benzéniques	vinylbenzène (<i>t</i>)	1245	-	917	891
	éthylbenzène	1113	1124	887	878
	benzoate de méthyle (<i>t</i>)	-	-	1126	1091
	p-xylène (<i>t</i>)	1120	1127	-	-
	toluène	1029	1042	764	770
cétones					
	1-hydroxypropan-2-one (<i>t</i>)	1290	1300	-	-
	pentane-2,3-dione	1054	1054	700	696
	pent-1-ène-2,3-dione (<i>t</i>)	1119	1120	880	-
	heptane-2,4-dione (<i>t</i>)	1205	1178	-	-
	butan-2-one	901	881	601	597
	2-méthylcyclopent-2-én-1-one (<i>t</i>)	1354	1357	-	-
	hexan-3-one	1043	1046	720	697
	hexane-3,4-dione	1135	1143	800	793
	3-hydroxybutan-2-one	1275	1272	709	710
	propan-2-one	814	817	509	577
	2-hydroxy-3-méthylcyclopent-2-én-1-one	1885	1837	1009	1006
	butane-2,3-dione	973	977	671	692
	β-damascénone (<i>t</i>)	-	-	1390	1391
	acétoxy-2-propanone	1390	1385	873	836

Tableau XIII (suite)

esters	propanoate de méthyle (<i>t</i>)	906	911	-	-
	acétate de méthyle	825	828	533	515
	salicylate de méthyle	1754	1782	1229	1217
furanes	1-furan-2-yl-propan-2-one (<i>t</i>)	1512	1522	955	-
	2-(furan-2-ylméthoxyméthyl)-furan	1975	1977	1304	1335
	2,2'-bis(furane) (<i>t</i>)	1585	-	1069	1070
	2,3,5-triméthylfuran (<i>t</i>)	1048	1056	-	-
	2,3-dihydrobenzofurane (<i>t</i>)	2367	2302	-	-
	2,4-diméthylfuran	961	978	713	730
	2,5-diméthylfuran	947	943	808	831
	1-(5-méthylfuran-2-yl)-éthanone (<i>t</i>)	1466	-	1039	1039
	1-(2-furanyl)-éthanone	1494	1475	914	910
	2-éthyl-5-méthylfuran (<i>t</i>)	1026	1028	-	-
	2-méthyl-3(2 <i>H</i>)-furanone (<i>t</i>)	1232	1266	-	-
	2-méthyl-5-propénylfuran (<i>t</i>)	1272	1304	-	-
	2-méthylfuran	866	877	606	603
	2-pentylfuran (<i>t</i>)	1226	1240	-	-
	2-vinylfuran (<i>t</i>)	1254	-	989	950
	2-furfurylthiol	1480	1456	810	800
	3-méthyl-2(5 <i>H</i>)-furanone (<i>t</i>)	1731	1707	1325	-
	3-phénylfuran (<i>t</i>)	1837	-	1226	1208
	5-hydroxy-2-méthylfurfural	2530	2528	1248	1250
	5-éthyl-2-furfural (<i>t</i>)	1626	-	1085	1080
	5-méthyl-2-furfural	1565	1560	971	978
	2-furaneméthanol	1662	1661	866	866
	benzofuran (<i>t</i>)	1490	1521	-	-
	2-méthylloxolan-3-one	1251	1266	842	805
	4-hydroxy-2,5-diméthyl-3-furanone	2029	2039	1087	1090
	furan-2-carbaldéhyde	1459	1458	841	832
	acétate de furan-2-ylméthyle	1590	1599	997	991
	(<i>E</i>)-4-furan-2-ylbut-3-én-2-one	1635	1651	1055	1070
	formate de furan-2-ylméthyle	1493	1509	907	900
	furfuryl méthyl éther (<i>t</i>)	1234	-	828	833
	2-(méthylsulfanylméthyl)-furan	1477	1465	1001	998
	propanoate de furan-2-ylméthyle	1694	1690	1088	1084
	γ -butyrolactone	1605	1640	916	915
oxazoles	2,4,5-triméthyl-oxazole	1196	1214	851	857
phénoliques	2-méthoxy-4-prop-2-énylphénol (<i>t</i>)	-	-	1415	1451
	3,4-diméthylphénol (<i>t</i>)	1253	1260	-	-
	4-éthyl-2-méthoxyphénol	2019	2048	1281	1285
	2-méthoxy-4-vinylphénol	2183	2181	1318	1317
	2-méthoxyphénol	1842	1848	1120	1091
	phénol	1067	1050	989	980
	4-méthoxyphénol (<i>t</i>)	-	-	1160	1183
pyrazines	2,3,5-triméthylpyrazine	1398	1406	1005	1000
	2,3-diéthyl-5-méthylpyrazine (<i>t</i>)	-	-	1186	1158
	2,3-diéthylpyrazine (<i>t</i>)	1449	1449	-	-
	2,3-diméthylpyrazine	1338	1315	921	917
	2,5-diéthylpyrazine (<i>t</i>)	1453	1458	-	-
	2,5-diméthylpyrazine	1315	1320	913	895
	2,6-diméthylpyrazine	1322	1324	915	913

Tableau XIII (suite)

	2,6-diéthyl-3-méthylpyrazine (<i>t</i>)	-	-	1189	1160
	2,6-diéthylpyrazine	1429	1463	922	913
	2-éthyl-3,5-diméthylpyrazine	1442	1449	1086	1083
	2-éthyl-3-méthylpyrazine (<i>t</i>)	1398	1400	-	-
	2-éthyl-5-méthylpyrazine	1385	1386	1004	976
	2-éthyl-6-méthylpyrazine	1379	1381	1001	1003
	2-éthylpyrazine	1326	1330	918	906
	2-isobutyl-3-méthoxypyrazine (<i>t</i>)	1521	1514	-	-
	2-méthyl-6-vinylpyrazine	1480	1521	1018	985
	2-méthyl- <i>N</i> -propylpyrazine (<i>t</i>)	1461	1450	1015	-
	2-méthylpyrazine	1258	1251	821	827
	2-vinylpyrazine	1428	1467	931	901
	3,5-diéthyl-2-méthylpyrazine (<i>t</i>)	1489	1524	1056	-
	3-méthyl-2-acétylpyrazine	1677	1635	1124	-
	5-méthyl-6,7-dihydro-(5 <i>H</i>)-cyclopentapyrazine	1607	1596	1143	1148
	acétylpyrazine	1611	1638	1023	1022
	propylpyrazine	1410	1447	1036	1030
	pyrazine	1205	1231	730	734
pyridines	2-acétyl-5-méthylpyridine (<i>t</i>)	1614	-	1136	1135
	2-acétylpyridine (<i>t</i>)	1587	-	1035	1035
	2-méthylpyridine (<i>t</i>)	1218	1227	820	820
	3-éthylpyridine (<i>t</i>)	1372	1401	-	-
	3-méthylpyridine (<i>t</i>)	1286	-	872	866
	pyridine	1177	1193	743	753
pyrroles	1-éthylpyrrole (<i>t</i>)	1171	1194	-	-
	1-méthylpyrrole	1129	1149	737	760
	1-(1-méthylpyrrol-2-yl)-éthanone	1641	1647	1076	1100
	1-(1 <i>H</i> -pyrrol-2-yl)-éthanone (<i>t</i>)	1959	-	1066	1060
	1-méthylpyrrole-2-carbaldéhyde	1604	1661	1010	970
	1 <i>H</i> -pyrrole-2-carbaldéhyde	2010	2030	1047	997
	furfurylpyrrole	1816	1817	1184	1133
	pyrrole	1508	1509	753	749
	indole	2606	2600	1298	1293
soufrés	disulfure de diméthyle	1061	1077	741	760
	méthanethiol	685	635	480	500
terpènes et autres	pentan-1,3-diène	644	624	-	-
	β-pinène	1164	1124	935	939
	limonène	1184	1212	1031	1030
	maltol	1950	1955	1115	1111
	myrcène	1156	1168	991	991
	β- <i>cis</i> -ocimène	1230	1245	1026	1040
	β- <i>trans</i> -ocimène	1245	1242	1077	1050
thiazoles	2-acétylthiazole	1632	-	1019	1020
	4,5-diméthylthiazole	1345	1372	-	-
	4-méthylthiazole	1274	1279	816	818
	thiazole (<i>t</i>)	1242	1243	-	-
thiophènes	2-formylthiophène	1676	1679	1003	995
	2-méthylthiophène (<i>t</i>)	1108	1095	-	-
	3-acétylthiophène (<i>t</i>)	1751	-	1085	1065

Tableau XIII (suite et fin)

3-méthylthiophène	1080	1094	769	786
thiophène (t)	1015	1023	-	-

(t) : tentative d'identification

Tous ces composés ont déjà été recensés dans différentes publications [67, 68, 76, 77], dans la fraction volatile de divers cafés et la composition globale est en accord avec la variété Arabica. Selon Korhonova *et al.*, [91] l'acide acétique, le 2-méthylpyrazine, le furfural, l'alcool furfurylique, le 2,6-diméthylpyrazine et le 5-méthylfurfural sont des marqueurs de différenciations entre le Robusta et l'Arabica.

2.2.1.3. Evolution de la composition aromatique

Afin de mener à bien ce travail et de mettre en évidence une variabilité annuelle ou dépendante des traitements post-récolte, les composés aromatiques identifiés sont quantifiés sur la colonne polaire à l'aide d'un étalon interne.

2.2.1.3.1. Comparaison entre deux années 2006 et 2007

Le Tableau XIV indique les teneurs des composés dont la concentration est supérieure ou égale à 1 ppm lors d'au moins d'une année.

Tableau XIV

Liste des composés aromatiques identifiés dans le café torréfié en poudre, sur la colonne polaire pour les deux années de récoltes avec leur teneur moyenne exprimée en ppm.

Classe chimique	Nom des composés	SPME pol. 2006	SPME pol. 2007
acides	acide acétique	37,65	29,60
	acide 3-méthylbutanoïque	3,40	12,65
	acide sénéciioïque	2,36	20,29
<i>somme acides</i>		<i>43,26</i>	<i>62,94</i>
alcools	linalol	1,64	1,62
<i>somme alcools</i>		<i>1,64</i>	<i>1,62</i>
aldéhydes	2-méthylbutanal	7,71	13,18
	2-méthylpropanal	1,02	1,41
	2-phénylacétaldéhyde	0,46	1,64
	3-méthylbutanal	3,81	6,23
	acétaldéhyde	1,91	6,44
	benzaldéhyde	3,56	8,35
<i>somme aldéhydes</i>		<i>18,47</i>	<i>37,25</i>
cétones	2-hydroxy-3-méthylcyclopent-2-én-1-one	-	2,02
	butan-2-one	4,96	3,98

Tableau XIV (suite)

	butane-2,3-dione	6,58	6,88
	1-hydroxypropan-2-one	12,97	17,01
	hexane-3,4-dione	1,81	0,83
	pentane-2,3-dione	16,33	13,90
	1-pentène-2,3-dione	0,97	1,07
	propan-2-one	8,82	9,62
<i>somme cétones</i>		<i>52,44</i>	<i>55,31</i>
esters	acétol acétate	12,63	6,29
	acétate de méthyle	3,90	3,96
<i>somme esters</i>		<i>16,53</i>	<i>10,25</i>
furanes	(E)-4-furan-2-ylbut-3-én-2-one	-	1,78
	1-(2-furanyl)-éthanone	50,46	40,66
	1-furan-2-yl-propan-2-one	-	2,59
	2,2'-bis(furane)	1,11	3,18
	2,5-diméthylfurane	3,64	2,55
	2-furaneméthanol	99,49	134,00
	2-méthyl-3(2H)-furanone	1,17	-
	2-méthylfurane	27,05	26,42
	2-méthyloxolan-3-one	9,90	1,22
	2-furfurylthiol	1,21	6,58
	2-vinylfurane	-	8,28
	3-méthyl-2(5H)-furanone	-	1,56
	4-hydroxy-2,5-diméthyl-3-furanone	4,42	1,82
	5-éthyl-2-furfural	0,84	2,07
	5-hydroxy-2-méthylfurfural	29,31	20,77
	5-méthyl-2-furfural	173,66	160,33
	furane-2-carbaldéhyde	153,41	134,32
	acétate de furan-2-ylméthyle	69,86	41,53
	formate de furan-2-ylméthyle	14,94	9,28
	γ-butyrolactone	2,22	0,93
<i>somme furanes</i>		<i>642,69</i>	<i>599,87</i>
phénoliques	2-méthoxy-4-vinylphénol	-	25,36
	2-méthoxyphénol	-	1,20
	4-éthyl-2-méthoxyphénol	-	1,17
	phénol	5,67	4,33
<i>somme phénoliques</i>		<i>5,67</i>	<i>32,06</i>
pyrazines	2,3,5-triméthylpyrazine	-	14,07
	2,3-diméthylpyrazine	5,03	2,81
	2,5-diméthylpyrazine	32,18	35,37
	2,6-diméthylpyrazine	28,35	25,91
	2,6-diéthylpyrazine	1,90	2,09
	2-éthyl-3,5-diméthylpyrazine	12,94	17,81
	2-éthyl-3-méthylpyrazine	5,41	5,88
	2-éthyl-5-méthylpyrazine	11,96	17,51
	2-éthyl-6-méthylpyrazine	16,38	10,44
	2-éthylpyrazine	18,61	13,65
	2-méthyl-6-vinylpyrazine	-	6,83
	2-méthyl-N-propylpyrazine	0,99	2,31
	2-méthylpyrazine	43,75	51,12
	2-vinylpyrazine	4,17	4,21
	3,5-diéthyl-2-méthylpyrazine	2,07	2,51
	3-méthyl-2-acétylpyrazine	-	7,65
	5-méthyl-6,7-dihydro-(5H)-cyclopentapyrazine	-	1,63

Tableau XIV (suite et fin)

	acétylpyrazine	2,49	4,00
	pyrazine	-	2,14
<i>somme pyrazines</i>		<i>186,23</i>	<i>227,94</i>
pyridines	2-acétyl-5-méthylpyridine	0,56	1,32
	2-acétylpyridine	2,08	2,28
	pyridine	15,25	8,38
<i>somme pyridines</i>		<i>17,89</i>	<i>11,98</i>
pyrroles	1-(1H-pyrrol-2-yl)-éthanone	3,03	10,57
	1-(1-méthylpyrrol-2-yl)-éthanone	3,85	4,69
	1H-pyrrole-2-carbaldéhyde	-	15,09
	1-méthylpyrrole	3,53	2,50
	1-méthylpyrrole-2-carbaldéhyde	15,71	11,34
	furfurylpyrrole	1,01	11,14
	indole	-	1,61
<i>somme pyrroles</i>		<i>27,13</i>	<i>45,71</i>
soufrés	disulfure de diméthyle	-	1,51
<i>somme soufrés</i>		<i>0,00</i>	<i>1,51</i>
terpènes et autres	pentan-1,3-diène	1,11	1,35
	β-pinène	-	8,86
	limonène	1,59	1,30
	maltol	-	3,81
	myrcène	1,97	1,63
	β-trans-ocimène	1,30	1,65
<i>Somme terpènes et autres</i>		<i>5,97</i>	<i>18,6</i>
thiazoles	4-méthylthiazole	1,20	1,23
<i>somme thiazoles</i>		<i>1,20</i>	<i>1,23</i>
thiophènes	2-acétylthiophène	0,58	2,73
	2-formylthiophène	2,99	6,09
	3-acétylthiophène	0,12	1,14
<i>somme thiophènes</i>		<i>3,69</i>	<i>9,96</i>

Ce tableau indique que les composés majoritaires dans le café sont l'acide acétique, le 2-furaneméthanol, le 5-méthyl-2-furfural, le furan-2-carbaldéhyde, le 2-méthylpyrazine, le 1-méthylpyrrole-2-carbaldéhyde. Ces résultats sont en accord avec d'autres études réalisées [92, 93].

Quelque soit l'année de récolte, la fraction aromatique se révèle riche en hétérocycles notamment les classes de pyrazines et de furanes sont bien représentées en nombre de composés et en concentration. De plus, la somme des concentrations (cétones/esters/aldéhydes/alcools) est supérieure à celle (composés phénoliques/composés soufrés/pyrroles). Les cétones, les esters, les aldéhydes et alcools confèrent aux Arabicas des notes fruitées, florales alors que les composés phénoliques, soufrés et les pyrroles sont responsables du caractère persistant en bouche des Robustas [68, 17].

Néanmoins, des différences peuvent être mises en évidence selon l'année de récolte comme le signalent Banks *et al.*, (1999) [94]

Ainsi, la concentration de toutes les classes de composés de 2007 est plus élevée par rapport à celle des classes de 2006, excepté pour celle des furanes, des esters, des cétones, des oxazoles et des pyridines. En effet, avec une torréfaction identique appliquée à tous les cafés, la concentration en furanes plus élevée en 2006 s'expliquerait par un taux de saccharose plus élevée en 2006 qu'en 2007, mesuré dans les échantillons de café vert. Il en est de même des pyridines qui sont issues de la dégradation thermique de la trigonelline, la concentration de cette dernière étant plus importante dans les échantillons de café vert de 2006. Enfin, la teneur plus élevée en composés phénoliques dans les échantillons de café torréfiés de 2007 serait due à une teneur en acide chlorogénique, principal précurseur des composés phénoliques, plus élevée dans les échantillons de café vert de 2007.

Cette variabilité annuelle pourrait être générée par la combinaison des différentes influences générées soit par les paramètres géoclimatiques, soit par des traitements post-récolte.

2.2.1.3.2. Recherche du facteur le plus influent dans l'évolution de la composition aromatique

Afin de mettre en évidence une prédominance des facteurs géoclimatiques (Zone, Altitude) ou des traitements (A, C, E, G), tous les échantillons (2006 et 2007) d'une même zone, d'une même altitude et d'un même traitement sont regroupés en un lot. Chaque regroupement est donc représenté par un lot de 6 échantillons, soit au total 36 regroupements pour 216 échantillons. Une analyse factorielle discriminante (AFD) a été réalisée sur l'ensemble des échantillons. Les variables quantitatives sont les moyennes des concentrations de chaque classe de composés. Le tableau XV donne la contribution des différentes classes chimiques aux deux composantes F1 et F2.

L'axe F1 est corrélé positivement avec les classes des pyrazines et des cétones et corrélé négativement avec les classes des thiophènes, alors que l'axe F2 est corrélé positivement les classes des pyridines et négativement avec les classes des alcools et thiazoles.

Tableau XV

Contribution des différentes variables aux deux composantes de l'AFD réalisée sur les échantillons de café torréfié en poudre « Bourbon Pointu ».

Classe de composés	F1	F2
acides	-0,107	0,303
alcools	-0,038	-0,331
aldéhydes	-0,148	0,098
cétones	0,435	0,405
esters	0,192	-0,104
furanes	0,210	0,312
phénoliques	-0,013	-0,038
pyrazines	0,509	0,164
pyridines	0,130	0,427
pyrroles	-0,062	0,139
soufrés	0,102	0,049
terpènes et autres	-0,007	0,013
thiazoles	0,052	-0,326
thiophènes	-0,356	-0,170

La représentation graphique des échantillons dans le plan 1, 2 (figure 17) montre d'une part, une discrimination complète sur les regroupements en fonction du traitement post-récolte et révèle d'autre part que l'année, la zone de l'île et la classe d'altitude n'ont aucune influence sur la composition aromatique du café torréfié « Bourbon Pointu ».

L'axe F1 discrimine le traitement A des traitements E et G. Les cafés issus de la transformation A ont des teneurs plus élevées en pyrazines et cétones que les autres cafés, tandis que les cafés issus des transformations E et G ont des teneurs plus élevées en thiophènes.

L'axe F2 permet de discriminer le traitement G des traitements E et C. Les transformations E et C, G sont nettement discriminées. Les cafés issus de la transformation E ont des teneurs plus élevées en thiophènes que les cafés issus des transformations C et G qui ont des teneurs plus élevées en pyridines et acides.

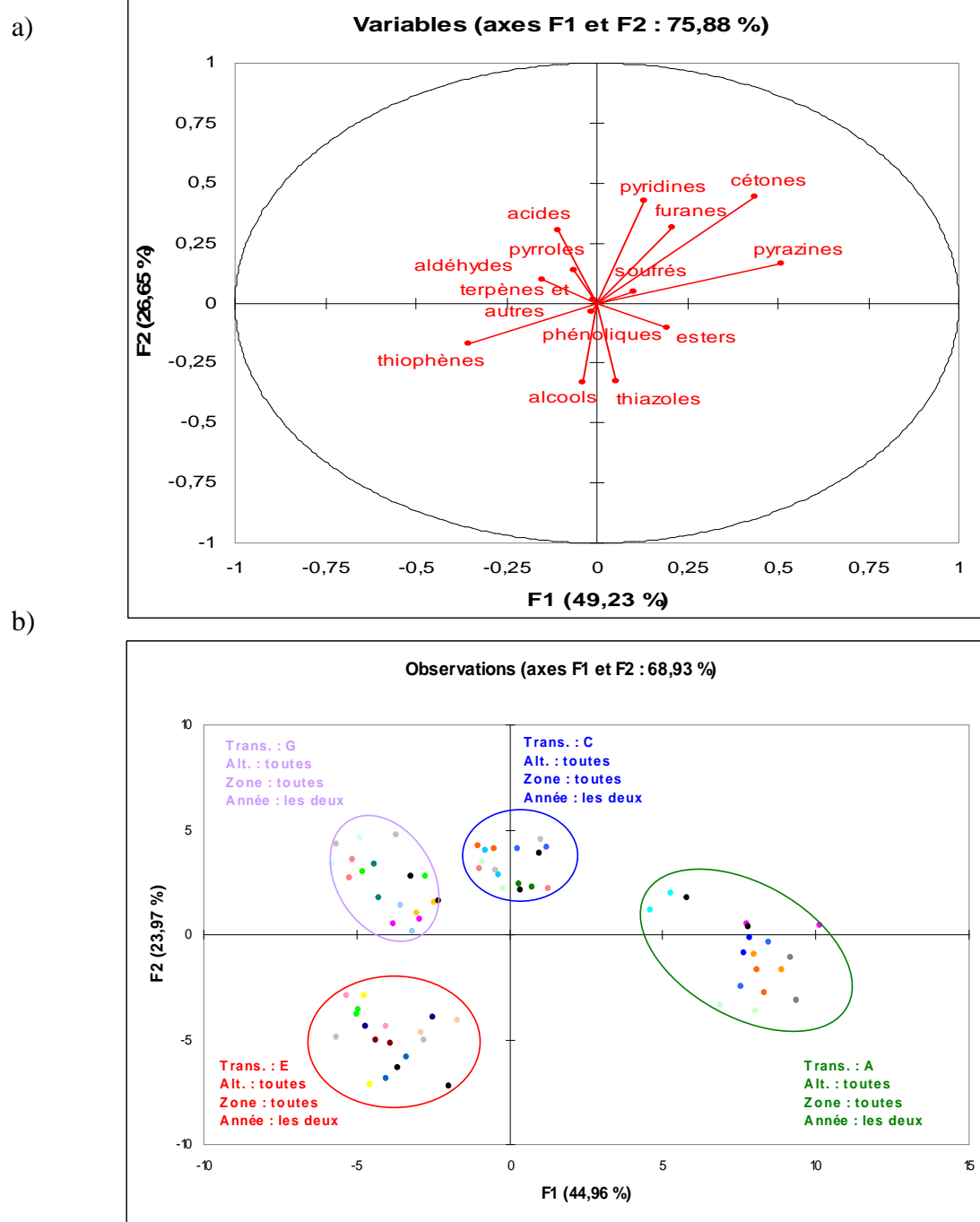


Figure 17: Représentation graphique de l'analyse factorielle discriminante sur les échantillons de café torréfié en poudre « Bourbon Pointu ».

- Représentation de la construction des axes 1, 2 et visualisation des vecteurs propres de l'AFD.
- Répartition des individus du café « Bourbon Pointu » sur l'axe 1, 2 de l'AFD.

2.2.1.3.3. Mise en évidence de distinctions plus fines au niveau du traitement post-récolte

Afin de déterminer les effets spécifiques du type de transformation post-récolte, une AFD a été appliquée sur les moyennes des concentrations des classes de composés aromatiques du café torréfié en fonction des quatre types de transformation post-récolte. Les variables qualitatives sont tous les échantillons regroupés dans leur type de transformation post-récolte respectif et les variables quantitatives sont les moyennes des concentrations des classes de composés aromatiques du café torréfié « Bourbon Pointu ». Le tableau XVI donne la contribution des différentes variables aux composantes aux axes F1 et F2.

Tableau XVI
Contribution des différentes variables aux composantes de l'AFD (no.2) réalisée sur les échantillons de café torréfié en poudre « Bourbon Pointu ».

Classe de composés	F1	F2
acides	-0,119	0,297
alcools	-0,019	0,303
aldéhydes	-0,145	0,198
cétones	0,456	0,442
esters	0,205	0,039
furanes	0,229	0,297
phénoliques	-0,002	0,212
pyrazines	0,520	0,370
pyridines	0,142	0,252
pyrroles	-0,045	0,354
soufrés	0,115	0,272
terpènes et autres	-0,003	0,135
thiazoles	0,040	-0,336
thiophènes	-0,370	-0,165

L'axe F1 est corrélé positivement avec les classes des pyrazines et des cétones et corrélé négativement avec les classes des thiophènes, alors que l'axe F2 est corrélé négativement avec les composés thiazoles.

Le tableau XVII ci-après récapitule les caractéristiques des quatre transformations post-récolte.

Tableau XVII
Caractéristiques des quatre transformations post-récolte.

	Dépulpage	Fermentation	Macération	Trempage	Lavage	Séchage
G	oui	< 600° (24h)	(0h)	(0h)	oui	oui
A	oui	500-550° (24h)	500-500° (24h)	(0h)	oui	oui
E	oui	250-300° (12h)	250-300° (12h)	250-300° (12h)	oui	oui
C	oui	500-550° (24h)	500-550° (24h)	250-300° (12h)	oui	oui

La représentation graphique des individus (figure 18) montre quatre groupes bien distincts correspondant aux quatre traitements. Il est à remarquer que l'évolution le long de l'axe 1 est liée à la durée de fermentation. Le groupe E correspondant au traitement E a une durée de fermentation de douze heures, les groupes G, C, A correspondant aux traitements G, C, A, fermentent pendant 24h. Le cercle de corrélation des données montre que le groupe A est corrélé à la teneur en pyrazines et en cétones, que le groupe E à la teneur en thiophènes et le groupe C à la teneur en thiazoles. Le groupe A subit à la fois une fermentation longue et un temps de macération long ; il est permis de penser qu'au cours de ces phases de préparations que les enzymes déjà présents dans la cerise soient activés et hydrolysent les protéines et polysaccharides favorisant alors la production de monosaccharides et d'acides aminés. La torréfaction favorise la production des pyrazines et des cétones par la voie des réactions de Maillard et de Strecker à partir de ces éléments comme l'ont signalé Jung *et al.*, (1999) [95] dans les graines de poivre rouge ou dans les graines de café [96]. La seule différence autre que le temps de fermentation dans le traitement post-récolte du groupe E et C réside dans le temps de macération (12h pour le groupe E et 24h pour le groupe C). Il semblerait que le temps de macération ait une influence sur la formation des thiophènes et des thiazoles. Le groupe G subit seulement une fermentation et se caractérise par la teneur en alcools, aldéhydes, acides.

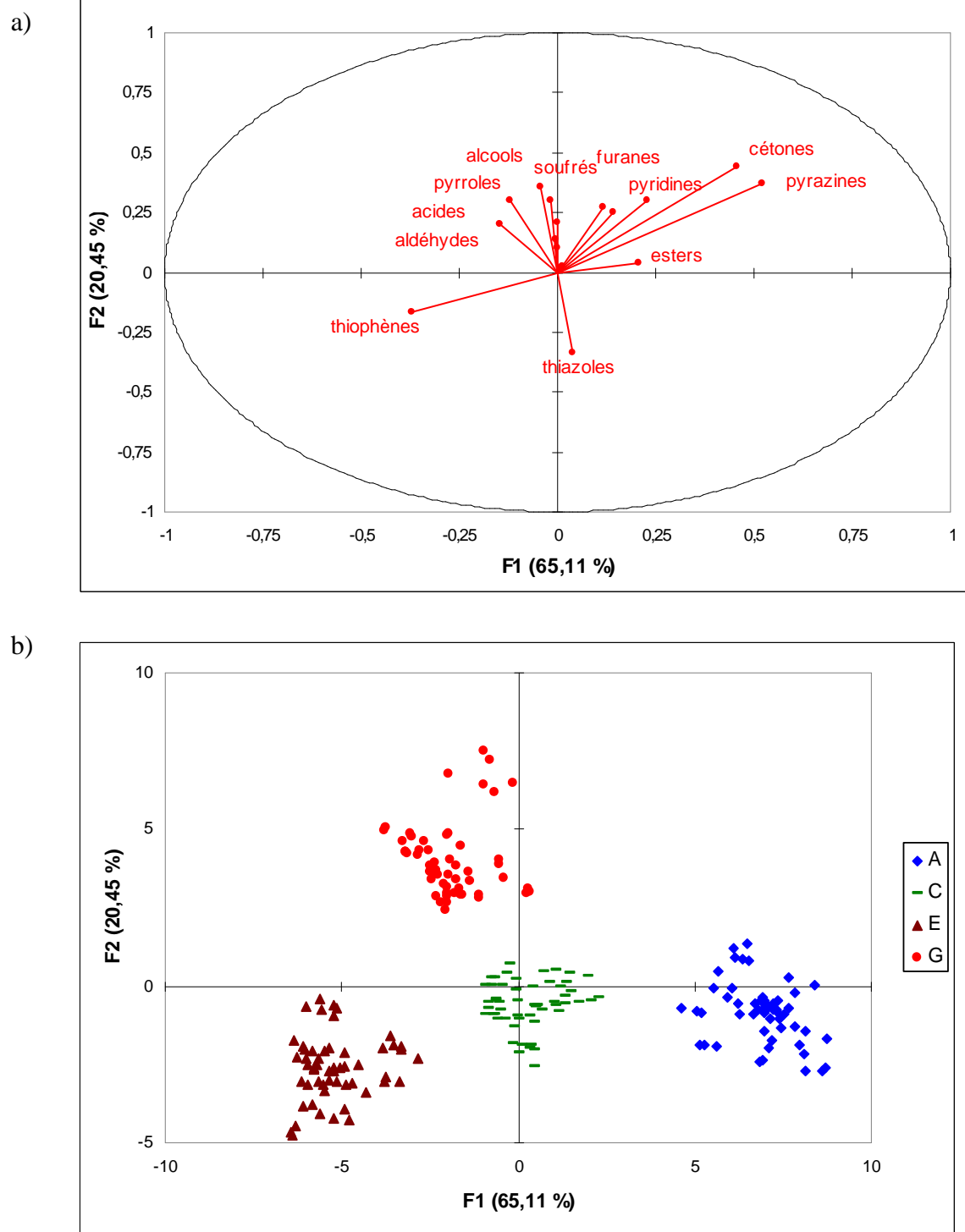


Figure 18: Représentation graphique de l'analyse factorielle discriminante (no.2) sur les échantillons de café torréfié en poudre « Bourbon Pointu ».

- Représentation de la construction des axes 1, 2 et visualisation des vecteurs propres de l'AFD.
- Répartition des individus du café « Bourbon Pointu » sur l'axe 1, 2 de l'AFD.

2.2.2. Fraction aromatique du café boisson

2.2.2.1. Méthodologie utilisée

Le café boisson est un mélange de composés volatils et non volatils. Toutes ces molécules au-delà de leurs propres solubilités dans un solvant donné interagissent entre elles par des liaisons faibles, influençant alors leur volatilité [97]. Le tableau XVIII répertorie les principales substances non volatiles et leur rôle dans le café boisson [98].

Tableau XVIII
Rôle des composés non volatils du café boisson.

Composés non volatils du café boisson	Rôle
Caféine	<i>Amertume et corps</i>
Trigonelline et deux dérivés (acide nicotinique et N-méthylnicotinamide)	<i>Astringence</i>
Polysaccharides : cellulose, hémicellulose, arabinogalactannes	<i>Augmentation de la viscosité du café boisson par rétention des composés volatils</i>
Mélanoïdines	<i>Couleur du café boisson</i>
Acides carboxyliques	<i>Acidité</i>
Acides chlorogéniques	<i>Astringence</i>
Lipides, terpènes, stérols	<i>Augmentation de la viscosité du café boisson</i>
Minéraux (Potassium)	<i>Catalyseurs de réactions</i>
Métaux (Manganèse, Fer)	

Mayer, Czerny and Grosch, (1999) [71] ont aussi mis en évidence une composition aromatique différente entre le café torréfié en poudre et le café boisson avec une concentration de molécules polaires plus élevée dans le café boisson. Pour cette raison, la technique de l'extraction sur phase solide (SPE), connue pour l'extraction préférentielle des molécules polaires semi-volatiles est privilégiée dans l'étude des arômes du café boisson. Le principe est basé sur l'adsorption sur une phase stationnaire des composés présents dans la solution suivie d'une élution sélective par un solvant ou un mélange de solvant. Les phases stationnaires solides (gel de silice C18, résine Amberlite XAD-2, carbone graphite...) sont de nature, de porosité et polarité variables [99]. Cette technique simple d'utilisation,

automatisable est aussi plus économe en solvant qu'une extraction liquide-liquide. Utilisée dans l'extraction des micropolluants d'eau douce [100, 101] ou de mer [102], son usage s'est étendu depuis à l'extraction des arômes en solution : boissons alcoolisées [103-106], de jus de fruits [107], de vinaigres [108], d'infusion de romarin [109]. La fraction volatile est adsorbée dans la plupart des expérimentations sur des cartouches remplies de gel de silice en C18 ou de résine LiChrolut-EN et l'élution a lieu avec du dichlorométhane.

2.2.2.2. Composition aromatique du café boisson

Après extraction, élution et injection sur colonne polaire et apolaire des fractions aromatiques obtenues en chromatographie gazeuse couplée à un spectromètre de masse et identification des composés sur la base de leurs spectres de masse et de leurs indices de rétention comparés aux des données de la littérature, 121 composés répartis dans 16 classes chimiques ont été identifiés comme l'indique le tableau XIX.

Tableau XIX

Liste des molécules identifiées dans le café boisson, sur colonne polaire et apolaire pour les deux années de récolte avec les indices de rétention relatifs calculés et de référence respectifs.

Classe	Nom des composés	I.R.R. polaire		I.R.R. apolaire	
		<i>calculé</i>	<i>théorique</i>	<i>calculé</i>	<i>théorique</i>
acides	acide acétique	1430	1434	602	600
	acide isovalérique	1690	1686	880	876
alcanes	hexane (<i>t</i>)	-	-	600	600
alcools	heptan-1-ol	1425	1453	954	955
	2-éthylhexan-1-ol	1484	1492	1010	1013
	3-méthylbutan-2-ol	1080	1094	700	666
	3-méthylbut-3-én-1-ol	1246	1240	710	705
	pent-4-én-2-ol	1707	1740	1205	1201
	5-méthylhexan-2-ol	1299	1348	840	845
	2-phényléthanol	1903	1903	1074	1078
	(2 <i>E</i>)-3,7-diméthyl octa-2,6-dién-1-ol (<i>t</i>)	-	-	1280	1276
	linalol	1560	1565	1109	1101
aldéhydes	hepta-2,4-diéнал (<i>t</i>)	1500	1490	1008	1003
	hex-2-éнал	1265	1250	960	957
	nona-2,4-diéнал	1710	1709	1218	1215
	2-méthylbut-2-éнал	1100	1090	735	715
	2-méthylbenzaldéhyde	1239	1217	1050	1066
	2-méthylbutanal	889	880	670	653
	2-phénylacétaldéhyde	1614	1609	1030	1049
	acétaldéhyde	701	714	402	427
	benzaldéhyde	1532	1525	987	961
	décanal	1450	1447	1235	1211

Tableau XIX (suite)

	dodécanal	1652	1648	1425	1413
	hexanal	1070	1067	840	820
	2-méthylpropanal	820	817	561	558
	3-méthylbutanal	949	936	645	641
	butanal (<i>t</i>)	-	-	624	620
benzéniques	1,3,5-triméthylbenzène	1281	1363	1001	994
	1-éthyl-3-méthylbenzène	1260	1222	964	958
	vinylbenzène (<i>t</i>)	-	-	900	891
	<i>p</i> -xylène	1074	1127	894	883
	toluène (<i>t</i>)	-	-	779	770
cétones	3-méthylcyclohexan-1-one (<i>t</i>)	1541	-	1001	972
	octa-1,6-diène (<i>t</i>)	1735	-	852	822
	2,3-diméthylcyclopent-2-én-1-one	1536	1524	980	972
	pentane-2,3-dione (<i>t</i>)	-	1054	697	696
	hexane-2,5-dione (<i>t</i>)	1521	-	931	933
	2,6-diméthylcyclohexanone (<i>t</i>)	1489	-	1020	994
	butan-2-one	913	881	563	597
	cyclopent-2-én-1-one	1345	1357	925	915
	heptan-2-one	1120	1160	874	882
	2-méthylcyclopent-2-én-1-one (<i>t</i>)	1368	1357	898	-
	hexan-3-one	1100	1046	700	697
	hexane-3,4-dione	1193	1143	798	793
	3-hydroxybutan-2-one	1295	1272	754	710
	cyclopentanone	1145	1154	912	901
	2-hydroxy-3-méthylcyclopent-2-én-1-one	1830	1837	1031	1006
esters	acétol acétate (<i>t</i>)	-	-	880	836
	acétate de méthyle (<i>t</i>)	835	828	524	515
furanes	2-(méthoxyméthyl)-furane	1238	1251	924	-
	2-(furan-2-ylméthoxyméthyl)-furane (<i>t</i>)	1975	1977	1325	-
	2,3-dihydrobenzofurane (<i>t</i>)	2385	2302	1984	-
	1-(5-méthylfuran-2-yl)-éthanone (<i>t</i>)	1459	-	1042	1039
	1-(2-furanyl)-éthanone	1503	1475	910	910
	2-furfurylthiol	1507	1456	805	800
	3-méthyl-2(5 <i>H</i>)-furanone (<i>t</i>)	1750	1707	1124	-
	5-hydroxy-2-méthylfurfural	2500	2528	1242	1250
	5-méthyl-2(5 <i>H</i>)-furanone (<i>t</i>)	1450	1433	1015	-
	(5-méthylfuran-2-yl)-méthanol (<i>t</i>)	1717	1745	1245	-
	5-méthyl-2-furfural	1572	1560	984	978
	2-furaneméthanol	1659	1661	870	866
	2-méthylloxolan-3-one	1256	1266	825	805
	4-hydroxy-2,5-diméthyl-3-furanone	2028	2039	1095	1090
	furane-2-carbaldéhyde	1463	1458	845	832
	(<i>E</i>)-4-furan-2-ylbut-3-én-2-one	1699	1651	1062	1050
	formate de furan-2-ylméthyle	1494	1519	925	930
	γ -butyrolactone	1627	1640	920	915
oxazoles	1,3-benzoxazole (<i>t</i>)	1754	1759	1565	-
phénoliques	2-méthoxy-4-prop-2-énylphénol	2064	2141	1465	1451
	2-méthoxy-4-vinylphénol	2188	2181	1345	1317
	2-méthoxyphénol	1853	1848	1099	1091
	phénol	1099	1050	986	980
pyrazines	1-(6-méthyl-2-pyrazinyl)-1-éthanone (<i>t</i>)	1689	1679	1125	-

Tableau XIX (suite et fin)

	2,3,5-triméthylpyrazine	1401	1406	1018	1000
	2,3-diéthylpyrazine (<i>t</i>)	-	1449	1056	1082
	2,3-diméthyl-5-éthylpyrazine	1456	1493	1112	1100
	2,3-diméthylpyrazine	1345	1315	928	917
	2,5-diméthylpyrazine	1321	1320	900	895
	2,6-diméthylpyrazine	1327	1324	906	913
	2,6-diéthylpyrazine	1428	1463	920	913
	2-acétyl-3-méthylpyrazine	1681	1635	1120	1085
	2-éthyl-3,5-diméthylpyrazine	1456	1449	1085	1083
	2-éthyl-5-méthylpyrazine	1388	1386	999	976
	2-éthyl-6-méthylpyrazine	1382	1381	1001	1003
	2-éthylpyrazine	1331	1330	905	906
	2-méthyl-5-propyl-pyrazine (<i>t</i>)	1502	-	1268	1260
	2-méthyl-6-vinylpyrazine (<i>t</i>)	-	-	1017	985
	2-méthylpyrazine	1267	1251	831	827
	2-vinylpyrazine	1435	1467	904	901
	3-éthyl-2,5-diméthylpyrazine	1440	1449	1090	1083
	acétylpyrazine	1660	1638	1020	1022
	pyrazine	1217	1231	736	734
pyridines	2-acétylpyridine (<i>t</i>)	1599	-	1041	1035
	2-pyridineméthanol (<i>t</i>)	2115	2110	1665	-
	3-méthylpyridine (<i>t</i>)	-	-	871	866
	pyridine	1191	1193	735	753
pyrroles	1-(1 <i>H</i> -pyrrol-2-yl)-éthanone	1963	1950	1031	1024
	1-méthylpyrrole (<i>t</i>)	1134	1149	754	-
	1-(1-méthylpyrrol-2-yl)-éthanone (<i>t</i>)	1650	1647	1098	-
	1-méthylpyrrole-2-carbaldéhyde	1602	1661	981	970
	1 <i>H</i> -pyrrole-2-carbaldéhyde	2019	2030	1014	997
	2-méthylpyrrole	1588	1570	854	812
	5-méthyl-1 <i>H</i> -pyrrole-2-carboxaldéhyde (<i>t</i>)	2277	2112	1885	-
	furfurylpyrrole	1820	1817	1135	1133
	pyrrole	1511	1509	754	749
terpènes et autres	β-pinène	1123	1124	938	939
	β- <i>cis</i> -ocimène (<i>t</i>)	1241	1245	1030	-
	éthyl maltol (<i>t</i>)	-	-	1084	1076
	limonène	1198	1212	1041	1030
	maltol	1976	1955	1120	1111
	β- <i>trans</i> -ocimène	1243	1245	1034	1040
	quinoxaline (<i>t</i>)	1875	1879	1454	-
thiazoles	2-acétylthiazole (<i>t</i>)	1661	-	1023	1020
	4,5-diméthylthiazole	1326	1370	925	928
	benzothiazole	1343	1372	910	906
	thiazole (<i>t</i>)	1228	1243	889	-
thiophènes	2-acétylthiophène (<i>t</i>)	-	-	1080	1086
	2-éthylthiophène	1200	1185	879	874
	2-formylthiophène (<i>t</i>)	-	-	1021	995
	2-thiophèneméthanol (<i>t</i>)	-	-	1005	1000
	2,2-dihydro-3-méthyl(2 <i>H</i>)-thiophénone	1125	1155	830	825

(*t*) : tentative d'identification

Comme dans les résultats issus de l'analyse en SPME dans le café torréfié en poudre, les composés identifiés sont déjà signalés dans les travaux traitant de l'arôme de café torréfié en poudre et en boisson.

Les composés les plus nombreux sont les furanes, les pyrazines et les cétones. Ils représentent environ 45 % du nombre total des composés identifiés. Plus de 80 % des molécules de la fraction aromatique ont été identifiées.

Ces composés ont été quantifiés par l'usage d'un étalon interne, le *trans*-oct-2-énal sur colonne polaire pour les deux campagnes de récolte 2006 et 2007. Les teneurs moyennes des composés dont la concentration est supérieure ou égale à 1 mg/L lors d'au moins d'une année sont données dans le tableau XX.

Tableau XX

Liste des composés aromatiques identifiés dans le café boisson, sur la colonne polaire pour les deux années de récoltes avec leur teneur moyenne exprimée en mg/L.

Classe chimique	Nom des composés	SPE PO 2006	SPE PO 2007
acides	acide acétique	28,91	17,66
	acide isovalérique	0,69	1,59
<i>somme acides</i>		<i>29,61</i>	<i>19,25</i>
alcools	2-éthylhexan-1-ol	6,63	-
	3-méthylbutan-2-ol	0,19	1,17
	3-méthyl-3-butén-1-ol	-	1,80
	pent-4-én-2-ol	4,98	-
	2-phényléthanol	3,61	0,37
	linalol	1,88	0,26
<i>somme alcools</i>		<i>17,29</i>	<i>3,60</i>
aldéhydes	nona-2,4-diène	1,05	1,21
	2-méthylbut-2-énal	1,13	1,05
	2-phénylacétaldéhyde	1,23	-
	acétaldéhyde	0,68	3,80
	benzaldéhyde	1,39	2,66
	décanal	1,10	1,02
	dodécanal	1,16	0,95
	hexanal	1,83	0,78
	3-méthylbutanal	-	1,07
<i>somme aldéhydes</i>		<i>9,57</i>	<i>12,55</i>
benzéniques	<i>p</i> -xylène	5,16	3,21
<i>somme benzéniques</i>		<i>5,16</i>	<i>3,21</i>
cétones	octa-1,6-diène	0,49	2,06
	hexane-2,5-dione	1,43	0,29
	2,6-diméthylcyclohexanone	0,58	1,50
	butan-2-one	-	2,48
	2-méthylcyclopent-2-én-1-one	1,52	0,45
	hexan-3-one	7,02	5,16

Tableau XX (suite)			
	hexane-3,4-dione	1,11	0,80
	3-hydroxybutan-2-one	2,96	-
	cyclopentanone	14,38	18,14
	2-hydroxy-3-méthylcyclopent -2-én-1-one	2,57	1,65
<i>somme cétones</i>		<i>32,06</i>	<i>32,53</i>
furanes	2-(méthoxyméthyl)-furane	3,90	0,85
	1-(5-méthylfuran-2-yl)-éthanone	6,24	0,39
	1-(2-furanyl)-éthanone	12,72	8,95
	2-furfurylthiol	1,09	5,26
	5-hydroxy-2-méthylfurfural	14,25	3,83
	5-méthyl-2(5H)-furanone	3,77	0,87
	5-méthyl-2-furfural	40,90	31,96
	2-furaneméthanol	342,16	472,14
	2-méthyloxolan-3-one	4,31	3,57
	4-hydroxy-2,5-diméthyl-3-furanone	16,21	3,60
	furane-2-carbaldéhyde	98,05	77,39
	formate de furan-2-ylméthyle	2,24	1,75
	γ-butyrolactone	159,70	35,87
<i>somme furanes</i>		<i>705,54</i>	<i>646,43</i>
oxazoles	1,3-benzoxazole	3,34	-
<i>somme oxazoles</i>		<i>3,34</i>	<i>0,00</i>
phénoliques	2-méthoxy-4-vinylphénol	-	2,65
	2-méthoxyphénol	2,32	0,85
	phénol	1,36	1,04
<i>somme Comp. phénoliques</i>		<i>3,68</i>	<i>4,54</i>
pyrazines	1-(6-méthyl-2-pyrazinyl)-éthanone	4,48	1,42
	2,3,5-triméthylpyrazine	10,48	2,90
	2,3-diméthylpyrazine	11,65	2,87
	2,5-diméthylpyrazine	15,63	6,80
	2,6-diméthylpyrazine	15,16	6,91
	2-acétyl-3-méthylpyrazine	3,18	1,17
	2-éthyl-3,5-diméthylpyrazine	1,40	-
	2-éthyl-5-méthylpyrazine	8,92	2,95
	2-éthyl-6-méthylpyrazine	4,50	2,04
	2-éthylpyrazine	-	3,39
	2-méthyl-5-propyl-pyrazine	1,06	-
	2-méthylpyrazine	55,30	90,45
	2-vinylpyrazine	1,41	0,53
	3-éthyl-2,5-diméthylpyrazine	1,56	0,70
	pyrazine	6,92	1,95
<i>somme pyrazines</i>		<i>141,65</i>	<i>124,08</i>
pyridines	2-pyridineméthanol	6,54	-
	pyridine	23,40	9,44
<i>somme pyridines</i>		<i>29,94</i>	<i>9,44</i>
pyrroles	1-(1H-pyrrol-2-yl)-éthanone	9,83	3,82
	1-méthylpyrrole	2,67	0,07
	1-méthylpyrrole-2-carbaldéhyde	5,94	1,85
	1H-pyrrole-2-carbaldéhyde	15,15	5,43
	2-méthylpyrrole	5,15	2,66
	pyrrole	1,17	0,58
<i>somme pyrroles</i>		<i>39,61</i>	<i>14,41</i>
terpènes et autres	β-pinène	2,45	1,99

Tableau XX (suite et fin)			
	β -cis-ocimène	1,81	1,12
	limonène	1,11	1,27
	maltol	12,39	2,55
	<i>somme terpènes et autres</i>	<i>17,76</i>	<i>6,93</i>
thiazoles	benzothiazole	0,48	1,09
	<i>somme thiazoles</i>	<i>0,48</i>	<i>1,09</i>
thiophènes	2-thiophèneméthanol	1,74	1,08
	<i>somme thiophènes</i>	<i>1,74</i>	<i>1,08</i>

Quelque soit l'année, les furanes, les pyrazines et les cétones interviennent pour une part importante dans la concentration globale de la fraction aromatique et leurs concentrations sont relativement stables d'une année sur l'autre. L'acide acétique (28,91-17,66 mg/L), le 5-méthyl-2-furfural (40,90-31,96 mg/L), le 2-furaneméthanol (342,16-472,14 mg/L), le furan-2-carbaldéhyde (98,05-77,39 mg/L), la γ -butyrolactone (159,70-35,87 mg/L), la 2-méthylpyrazine (55,30-90,45 mg/L) sont les composés majoritaires. Le 5-méthyl-2-furfural et le furan-2-carbaldéhyde sont des indicateurs de qualité d'un Arabica [110]. La plupart de ces composés majoritaires dans le café boisson sont aussi majoritaires dans les poudres de café torréfié.

2.2.2.2.1. Etude de la variation de la composition

Dans le cas des cafés torréfiés en poudre, une différenciation selon les traitements post-récolte a été mise en évidence en tenant compte des classes chimiques. Il est donc intéressant de vérifier si cette différenciation est aussi possible à partir des extraits obtenus par SPE en prenant comme critères les différentes classes chimiques. Quatre groupes d'échantillons correspondant aux quatre traitements sont donc prédéfinis, les variables quantitatives étant les moyennes des concentrations des classes de composés aromatiques du café boisson calculées en fonction des quatre types de transformation post-récolte. La contribution des différentes classes aux composantes F1 et F2 de l'analyse factorielle discriminante est donnée dans le tableau XXI.

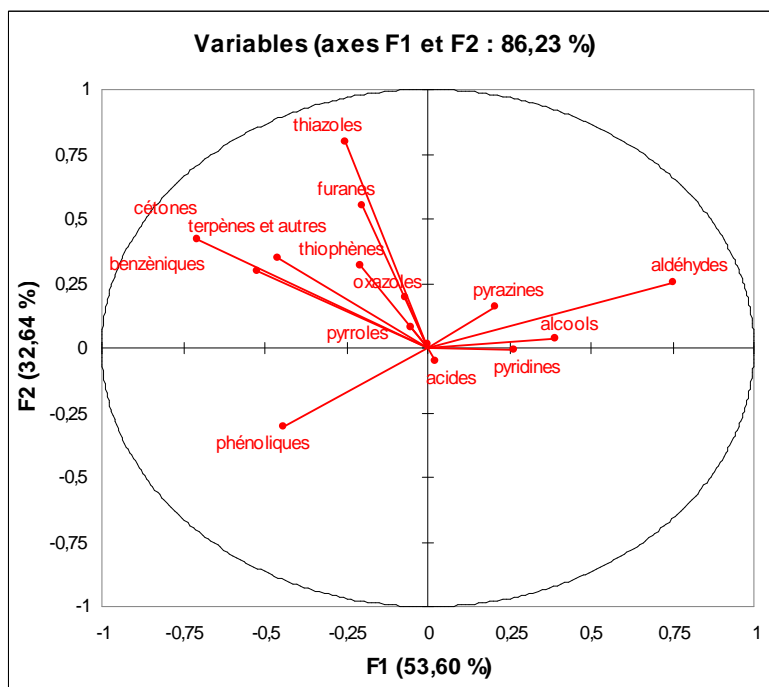
Tableau XXI :
Contribution des différentes variables aux composantes de l'AFD réalisée sur les échantillons de café
boisson « Bourbon Pointu ».

Classes de composés	F1	F2
acides	0,031	-0,076
alcools	0,375	0,080
aldéhydes	0,695	0,318
benzéniques	-0,574	0,096
cétones	-0,770	0,255
furanes	-0,300	0,430
oxazoles	-0,104	0,172
phénoliques	-0,389	-0,460
pyrazines	0,169	0,107
pyridines	0,256	-0,012
pyrroles	-0,064	0,049
terpènes et autres	-0,518	0,206
thiazoles	-0,384	0,800
thiophènes	-0,267	0,173

L'axe F1 est corrélé positivement avec la classe des aldéhydes et négativement avec la classe des cétones tandis que l'axe F2 est corrélé positivement la classe des thiazoles et dans une moindre mesure avec la classe des furanes et corrélé négativement avec la classe des composés phénoliques.

La représentation graphique des échantillons (figure 19) montre quatre groupes bien distincts, homogènes correspondant aux 4 traitements. L'axe F1 sépare les groupes qui ont subi un trempage de ceux qui n'en ont pas été soumis. Le groupe G a subi uniquement la fermentation et se caractérise par la teneur en aldéhydes, alcools et pyrazines. Le groupe A diffère dans son traitement du groupe G par une étape de macération et des groupes E et C par l'absence de trempage et il se caractérise par la teneur en thiazoles, en furanes et accessoirement en cétones. Les groupes E et C sont les seuls groupes à subir un trempage et ils se caractérisent par leur teneur en composés phénoliques

a)



b)

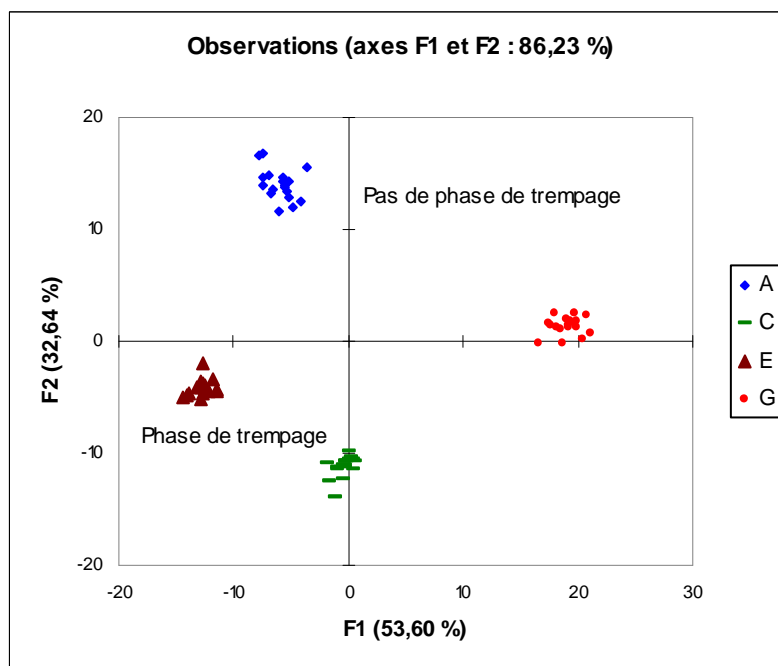


Figure 19 : Représentation graphique de l'analyse factorielle discriminante sur les échantillons de café boisson « Bourbon Pointu »

- a) Représentation de la construction des axes 1, 2 et visualisation des vecteurs propres de l'AFD.
- b) Répartition des individus du café « Bourbon Pointu » sur l'axe 1, 2 de l'AFD.

2.2.2.2. Recherche des molécules caractérisant les divers traitements post-récolte

Les analyses de données ont montré que les compositions volatiles du café torréfié et du café boisson sont influencées par le traitement post-récolte. Les molécules caractérisant de chaque type de traitement sont donc recherchées. Un fichier regroupant (tableau XXII) selon leur traitement les moyennes des concentrations des 29 molécules identifiées à la fois dans les poudres et les cafés boissons des années 2006 et 2007 a été constitué.

Tableau XXII
Moyennes des concentrations des 29 molécules identifiées à la fois dans les poudres et les cafés boissons des années 2006 et 2007 selon le type de transformation post-récolte.

Composé	No	A				C				E				G			
		SPME		SPE		SPME		SPE		SPME		SPE		SPME		SPE	
		2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007
acide acétique	a	36,64	25,04	17,05	28,50	35,00	31,70	17,55	29,93	35,55	27,95	17,58	29,71	43,42	33,73	18,48	27,51
acide isovalérique	b	3,49	10,55	1,15	0,47	2,98	15,17	0,27	0,87	3,32	10,97	2,29	0,96	3,83	13,92	2,65	0,48
linalol	c	1,70	1,63	0,18	1,94	1,52	1,41	0,07	1,60	1,80	1,69	0,58	0,87	1,55	1,75	0,21	3,12
acétaldéhyde	d	1,08	6,48	0,84	0,48	2,06	6,45	1,60	0,59	2,62	4,93	3,38	0,38	1,88	7,92	9,38	1,29
benzaldéhyde	e	1,90	8,82	0,59	0,19	3,62	8,04	1,03	1,18	5,19	6,05	2,23	0,96	3,54	10,50	6,80	3,23
hexane-3,4-dione	f	2,17	0,84	0,85	1,69	1,93	0,85	0,55	0,92	1,56	0,61	1,30	1,17	1,60	1,00	0,52	0,68
4-hydroxy-2,5-diméthyl-3-furanone	g	3,87	1,65	15,98	3,54	5,01	1,98	16,74	3,60	4,32	1,65	16,50	3,98	4,48	2,01	15,62	3,26
2-furfurylthiol	h	1,32	6,62	1,03	5,23	1,15	6,85	1,13	5,29	1,15	6,58	1,12	5,30	1,22	6,25	1,09	5,21
1-(2-furanyl)-éthanone	i	56,74	37,68	12,99	17,01	53,99	36,84	4,52	5,89	46,14	34,55	10,23	12,35	44,97	53,58	8,06	15,64
5-hydroxy-2-méthylfurfural	j	49,82	9,52	5,35	18,24	44,01	24,58	1,94	6,45	13,93	12,42	4,46	14,92	9,49	36,55	3,56	17,38
5-méthyl-2-furfural	k	202,68	143,62	47,93	53,56	195,50	155,09	15,83	18,08	156,96	140,69	35,92	39,25	139,49	201,92	28,17	52,71
2-furanéméthanol	l	115,69	120,98	254,01	441,63	107,83	124,81	87,65	151,63	89,88	116,60	196,99	361,60	84,58	173,63	149,92	413,79
2-méthyloxolan-3-one	m	11,11	1,06	5,13	5,39	10,91	1,19	1,85	2,13	8,99	1,15	3,98	4,48	8,60	1,48	3,31	5,23
furane-2-carbaldéhyde	n	174,56	107,57	113,42	131,20	173,67	131,46	37,93	46,26	140,74	120,69	88,40	102,73	124,68	177,56	69,81	112,00
formate de furan-2-yl méthyle	o	17,00	8,49	2,48	2,90	16,86	8,53	0,91	1,06	12,48	8,68	1,92	2,23	13,41	11,40	1,69	2,76
γ-butyrolactone	p	2,29	0,91	27,15	235,69	1,99	0,83	9,30	15,49	2,31	0,96	78,58	303,83	2,27	1,03	28,43	83,80
phénol	q	6,29	4,50	0,43	1,39	5,83	3,46	1,00	1,10	5,51	3,58	2,20	1,58	5,05	5,77	0,51	1,38
2,3-diméthylpyrazine	r	5,80	3,05	2,30	11,14	5,64	2,47	1,54	7,59	4,37	2,07	3,83	12,38	4,29	3,66	3,79	15,48
2,5-diméthylpyrazine	s	39,22	39,42	5,63	15,58	34,32	31,72	3,38	9,76	27,79	26,00	9,64	15,53	27,39	44,34	8,54	21,65
2,6-diméthylpyrazine	t	33,67	27,67	5,56	14,69	29,39	25,71	3,50	9,56	25,34	18,42	9,60	17,36	25,01	31,85	8,96	19,03
2-éthyl-5-méthylpyrazine	u	15,28	18,97	2,26	8,19	12,83	16,03	1,49	5,82	9,87	13,46	4,10	9,21	9,85	21,57	3,97	12,48
2-éthyl-6-méthylpyrazine	v	20,05	11,04	1,62	4,38	18,50	9,87	0,94	2,99	13,94	7,51	2,89	4,59	13,04	13,34	2,72	6,05
2-méthylpyrazine	w	52,66	54,67	17,06	52,11	46,57	46,15	11,40	34,56	40,08	37,60	27,80	58,64	35,70	66,08	25,53	75,90
2-vinylpyrazine	x	5,20	4,51	0,43	1,25	4,54	3,64	0,28	0,92	3,59	3,29	0,77	1,58	3,36	5,39	0,66	1,90
pyridine	y	16,93	6,34	9,49	16,99	18,36	9,30	6,87	18,22	12,20	6,93	8,79	25,86	13,50	10,94	12,59	32,54
1-méthylpyrrole	z	4,03	2,08	0,07	2,77	4,14	1,98	0,04	2,43	2,75	2,39	0,12	2,32	3,18	3,56	0,06	3,16
1-(1H-pyrrol-2-yl)-éthanone	aa	3,12	10,60	9,87	3,85	3,25	10,71	9,98	3,98	2,98	10,50	9,74	3,65	2,75	10,48	9,74	3,79
1-méthylpyrrole-2-carbaldéhyde	ab	16,78	9,65	1,96	6,56	17,65	9,22	1,12	5,49	13,00	11,09	3,01	5,43	15,41	15,39	1,33	6,29
limonène	ac	1,62	1,26	2,26	0,47	1,46	1,15	1,20	1,22	1,69	1,39	1,32	0,90	1,59	1,38	0,30	1,85

Une analyse factorielle discriminante a été réalisée à partir des 432 échantillons (108 échantillons x 2 années x 2 types d'analyses SPE/SPME) réparties en quatre groupes prédéfinis correspondant aux quatre traitements. La matrice de corrélation (tableau XXIII) montre que les échantillons se sont très bien classés par rapport aux groupes prédéfinis.

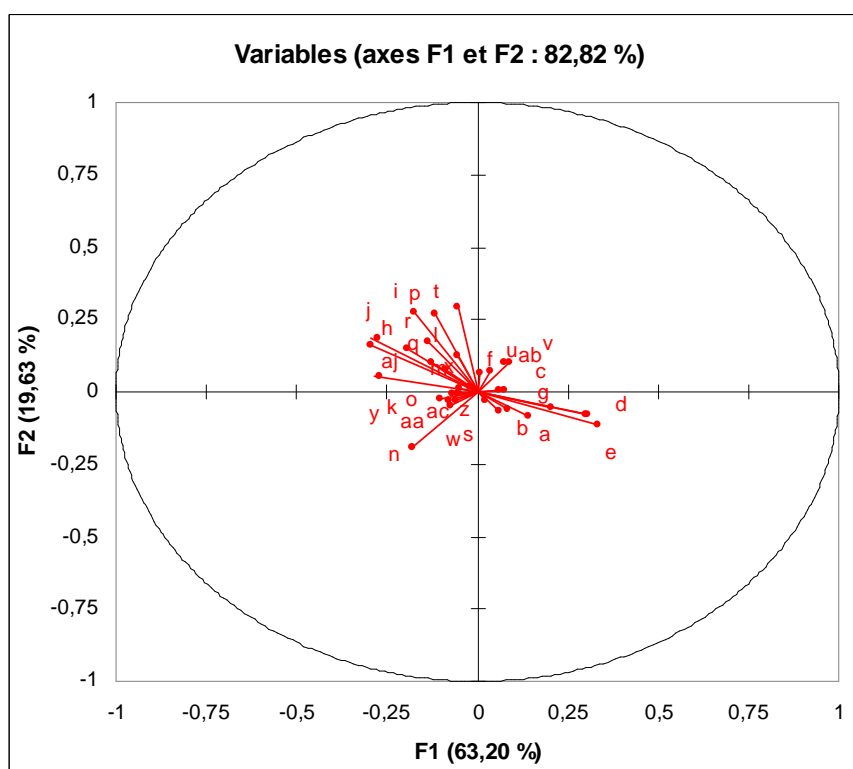
Tableau XXIII

Matrice de corrélation de l'AFD (no.2) des échantillons de café boisson « Bourbon Pointu ».

de \ Vers	A	C	E	G	Total	% correct
A	108	0	0	0	108	100%
C	0	103	0	5	108	95,4%
E	0	0	105	3	108	97,2%
G	0	3	2	103	108	95,4%
Total	108	106	107	111	432	97,0%

Les deux méthodologies permettent donc de voir les mêmes effets du traitement. La représentation graphique dans le plan 1,2 des individus (figure 20) et la matrice de corrélation montrent quatre groupes distincts. Seul le groupe G est caractérisé par l'acétaldéhyde, le benzaldéhyde, les autres groupes étant moins bien corrélés avec des marqueurs spécifiques.

a)



b)

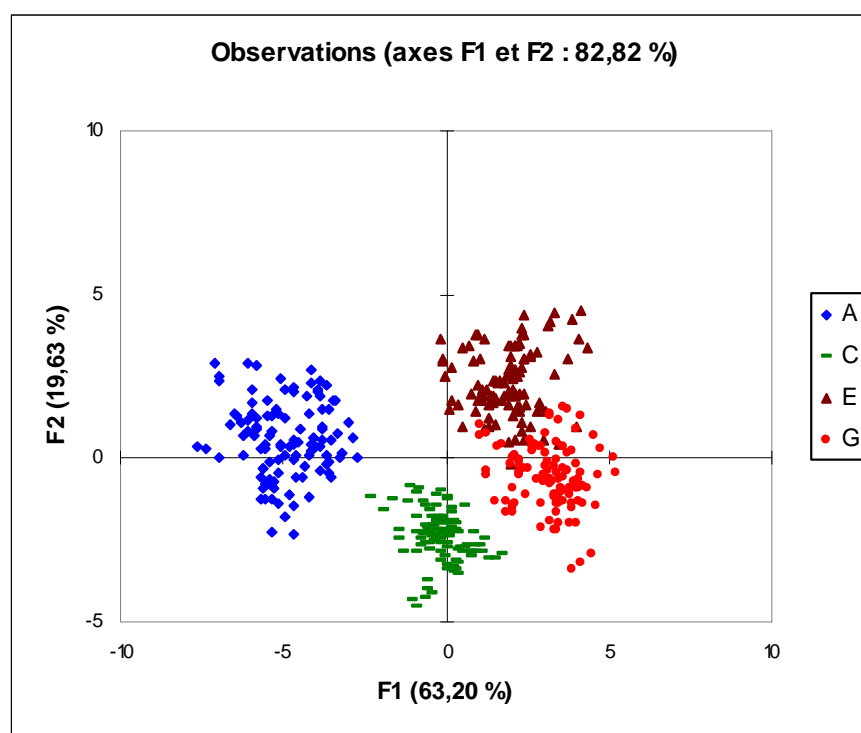


Figure 20 : Représentation graphique de l'analyse factorielle discriminante (no.2) sur les échantillons de café boisson « Bourbon Pointu »

- a) Représentation de la construction des axes 1, 2 et visualisation des vecteurs propres de l'AFD.
- b) Répartition des individus du café « Bourbon Pointu » sur l'axe 1, 2 de l'AFD.

Conclusion

Une cartographie plus précise de la composition chimique du café « Bourbon Pointu » (café vert et café torréfié) a été entreprise au cours de cette étude. Les composés suivants ont été identifiés et quantifiés dans les graines de café vert :

- *des oligosaccharides* dont le saccharose (composé majoritaire), le glucose, le fructose. La moyenne de leur teneur respective est 7,08%, 0,04% et 0,03% par gramme de matière sèche.

- *des alcaloïdes* et plus particulièrement la caféine et la trigonelline. La teneur en caféine, relativement faible est comprise entre 0,49-0,71% par gramme de matière sèche. Celle de la trigonelline est comprise entre 1,23-1,49% par gramme de matière sèche.

- *des polyphénols* dont les isomères de l'acide chlorogénique sont l'acide caféoyl-3-quinique (3-CQA), l'acide caféoyl-4-quinique (4-CQA), l'acide caféoyl-5-quinique (5-CQA), l'acide dicaféoyl-3,4-quinique (3,4-diCQA), l'acide dicaféoyl-3,5-quinique (3,5-diCQA), l'acide dicaféoyl-4,5-quinique (4,5-diCQA) et l'acide féruloyl-5-quinique (5-FQA). Les isomères du type CQA représente 80,2% de la fraction totale des acides chlorogéniques dont l'acide féruloyl-5-quinique (5-CQA) à hauteur de 4,72 % par gramme de matière sèche qui est le composé majoritaire

- *des acides gras libres* dont l'acide palmitique (C16:0 - 5,02 % /g matière sèche) et l'acide linoléique (C18:2 cc - 6,45 % /g de matière sèche) sont les plus importants quantitativement. D'autres acides gras ont aussi été identifiés. Parmi eux, l'acide stéarique (C18:0 - 1,01 %) et l'acide oléique (C18:1 n-9 - 1,04%)

L'influence des paramètres climatiques, de l'altitude et du traitement post-récolte a été étudiée par le suivi de la composition chimique au cours de deux campagnes de récolte successives. La concentration en acides gras, en saccharose et en acides chlorogéniques peuvent varier d'une année sur l'autre et sont dépendants de ces différents facteurs. Une analyse factorielle discriminante a permis de mettre en évidence une influence prépondérante de l'altitude par rapport aux deux autres facteurs sur l'évolution de cette composition chimique.

Le café vert a ensuite été soumis à une torréfaction. Quatre types de torréfaction à une température et une durée maximales, respectivement de 210°C et de 8 minutes ont été testées. L'analyse sensorielle des produits obtenus a permis de sélectionner un profil

descendant ayant une température initiale de 210°C d'une durée de cinq minutes. Ce profil a été appliqué aux 216 échantillons de café.

Les composés volatils des poudres et boissons issus des cafés torréfiés ont également été identifiés. La micro-extraction en phase solide (SPME) suivie de l'analyse en chromatographie gazeuse couplée à la spectrométrie de masse a permis l'identification de 146 composés répartis en 17 classes chimiques dans les poudres de café torréfié. Leur quantification montre une richesse particulière en pyrazines et en furanes. L'acide acétique, le 2-furaneméthanol, le 5-méthyl-2-furfural, le furfural, la 2-méthylpyrazine, le 1-méthylpyrrole-2-carbaldéhyde sont les composés majoritaires.

L'extraction en phase solide (SPE) des composés volatils solubilisés dans le café en tasse a conduit à l'identification de 121 composés avec la même prépondérance des pyrazines et des furanes. Les composés majoritaires sont les mêmes que ceux présents dans le café torréfié en poudre à l'exception du 1-méthylpyrrole-2-carbaldéhyde substitué dans la boisson par la γ -butyrolactone.

Au total, vingt-neuf composés sont présents à la fois dans les poudres et dans les boissons. Toutes les analyses SPME et SPE prises comme échantillons et les teneurs des vingt-neuf molécules communes considérées comme variables quantitatives ont permis par le biais d'une analyse factorielle discriminante de montrer que la composition aromatique est notablement influencée par le traitement. Le traitement G se distingue des autres traitements par une teneur plus marquée en acétaldéhyde et benzaldéhyde, les autres traitements post-récolte favorisant moins l'apparition de marqueurs spécifiques.

Références bibliographiques

1. Bicchi C. P., Binello A. E., Pellegrino G. M., Vanni A. C. Characterization of green and roasted coffees through the chlorogenic acid fraction by HPLC-UV and Principal Component Analysis. *J. Agric. Food Chem.*, **1995**, *43*, 1549-1555
2. Jham G. N., Berhow M. A., Manthey L. K., Palmquist D. A., Vaughn S. F. The use of fatty acid profile as a potential marker for Brazilian coffee (*Coffea Arabica* L.) for corn adulteration. *J. Braz. Chem. Soc.*, **2008**, *19*, 1462-1467
3. Zambonin C. G., Balest L., De Benedetto G. E., Palmisano F. Solid-phase microextraction-gas chromatography mass spectrometry and multivariate analysis for the characterization of roasted coffees. *Talanta*, **2005**, *66*, 261-265
4. Perrone D., Donangelo C. M., Farah A. Fast simultaneous analysis of caffeine, trigonelline, nicotinic acid and sucrose in coffee by liquid chromatography-mass spectrometry. *Food Chemistry*, **2008**, *110*, 1030-1035
5. Choi M. Y., Choi W., Park J. H., Lim J., Kwon S. W. Determination of coffee origins integrated metabolomic approach of combining multiple analytical data. *Food Chemistry*, **2010**, *121*, 1260-1268
6. Casal S., Oliviera M.B.P.P., Alves M. R., Ferreira M.A. Discriminate analysis of roasted coffee varieties for trigonelline, nicotinic acid and caffeine content. *J. Agric. Food Chem.*, **2000**, *48*, 3420-3424
7. El-Abassy R., Donfack P., Materny A. Discrimination between Arabica and Robusta green using visible micro Raman spectrometry and chemometric analysis. *Food Chemistry*, **2011**, *126*, 1143-1148
8. Duarte G. S., Pereira A. A., Farah A. Chlorogenic acids and other relevant compounds in Brazilian coffees processed by semi-dry and wet post-harvesting methods. *Food Chemistry*, **2010**, *118*, 851-855
9. Knopp S., Bytof G., Selmar D. Influence of processing on the content of sugars in green Arabica coffee beans. *Eur. Food Res. Technol.*, **2006**, *223*, 195-201.
10. Clifford M. N., Jarvis T. The chlorogenic acids content of green robusta coffee beans as a possible index of geographical origin. *Food Chemistry*, **1987**, *29*, 291-298
11. Costa Freitas A. M., Mosca A. I. Coffee geographic origin-an aid to coffee differentiation. *Food Research International*, **1999**, *32*, 565-573.
12. Lécolier A. Caractérisation de certains impacts de la mutation *Laurina* chez *Coffea arabica* L. aux niveaux histo-morphologique et moléculaire. *Thèse*. Université de la Réunion-CIRAD, **2006**.
13. Sondahl, M.R. Coffee breeding assisted by somaclonal variation: case of “Bourbon LC” variety. *19ème Colloque Scientifique International sur le Café, Trieste, Italy*, **2001**, 1-7
14. Techer I., Lancelot., Descroix F., Guyot B. About Sr isotopes in coffee « Bourbon Pointu » of the Réunion Island. *Food Chemistry*, **2011**, *126*, 718-724
15. Joët T., Laffargue A., Descroix F., Doulebeau S., Bertrand B., De Kochko A., Dussert S. (2010). Influence of environmental factors, wet processing and their interactions on the biochemical composition of green Arabica coffee beans. *Food Chemistry*, **2010**, *118*, 693-701
16. Casal S., Rui Alves M., Mendes E., Oliviera M. B. P. P., Ferreira M. A. Discrimination between arabica and robusta coffee species on the basis of their amino acid enantiomers. *J. Agric. Food Chem.*, **2003**, *51*, 6495-6501
17. Murkovic M., Derler K. Analysis of amino acids and carbohydrates in green coffee. *J. Biochem. Biophys. Methods*, **2006**, *69*, 25-32

18. Oosterveld A., Harmsen J. S., Voragen A. G. J., Shols H. A. Extraction and characterization of polysaccharides from green and roasted *Coffea arabica* beans. *Carbohydrate Polymers*, **2003**, 52, 285-296
19. Fisher M., Reimann S., Trovato V., Redgwell R. J. Polysaccharides of green arabica and robusta coffee beans. *Carbohydrate Polymers*, **2001**, 330, 93-101.
20. Ky C. L., Louarn J., Dussert S., Guyot B., Hamon S., Noirot M. Caffeine, trigonelline, chlorogenic acids and sucrose diversity in wild *Coffea arabica* L. and *C. canephora* P. accessions. *Food Chemistry*, **2001**, 75, 223-230.
21. Campa C., Ballester J. F., Doulebeau S., Dussert S., Hamon S., Noirot M. Trigonelline and sucrose diversity in wild *Coffea* species. *Food Chemistry*, **2004**, 88, 39-43.
22. Clark R. J. *Green coffee*. Ed. Encyclopedia in food sciences and nutrition, London, Academic Press, **2003**, 1481-1487.
23. Campa C., Doulebeau S., Dussert S., Hamon S., Noirot M. Diversity in bean caffeine content among wild *Coffea* species: evidence of a discontinuous distribution. *Food Chemistry*, **2004**, 91, 633-637.
24. Alonso-Salces R. M., Serra F., Reniero F., Héberger K. Botanical and geographical characterization of green coffee (*Coffea Arabica* and *Coffea canephora*): chemometric evaluation oh phenolic and methylxanthine content. *J. Agric. Food Chem.*, **2009**, 57, 4224-4235.
25. Guerrero G., Surez M., Moreno G. Chlorogenic acids as a potential criterion in coffee genotype selection. *J. Agric. Food Chem.*, **2001**, 49, 2454-2458.
26. Clifford M. N., Kazi T. The influence of coffee bean maturity on the content of chlorogenic acids, caffeine and trigonelline. *Food Chemistry*, **1987**, 26, 59-69.
27. Clifford M. N., Williams T., Bridson D. Chlorogenic acids and caffeine as possible taxonomic criteria in *Coffea* and *Psilanthus*. *Phytochemistry*, **1989**, 28, 829-838.
28. Andrade P. B., Leitao R., Seabra R. M., Oliveira M. B., Ferreira M. A. 3,4-dimethoxycinnamic acid levels as a tool for differentiation of *Coffea canephora* var. *robusta* and *Coffea arabica*. *Food Chemistry*, **1998**, 61, 511-514.
29. Alves R. C., Almeida I. M. C., Casal S., Oliveira M. B. P. P. Isoflavones in coffee: influence of species, roast degree, and brewing method. *J. Agric. Food Chem.*, **2010**, 58, 3002-3007.
30. Rui Alves M., Casal S., Oliveira M. B. P. P., Ferreira M. A. Contribution of FA profile obtained by high-resolution GC/Chemometric techniques to the authenticity of green and roasted coffee varieties. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, **2003**, 80, 511-517.
31. Nikolova-Damyanova B., Velikova R., Jham G. N. Lipid classes, fatty acid composition and triacylglycerol molecular species in crude coffee beans harvested in Brazil. *Food Research International*, **1998**, 31, 479-486.
32. Hagemann A., Voigt O., Worheide G., Thiel V. The sterols of calcareous sponges (Cacarea, Porifera). *Chemistry and Physics of Lipids*, **2008**, 156, 26-32.
33. Dembitsky V. M., Rezanka T., Srebnik M. Lipid compounds of freshwater sponges: family Spongillidae class Demospongiae. *Chemistry and Physics of Lipids*, **2003**, 123, 117-155.
34. Applequist W. L., Avula B., Schaneberg B. T., Wang Y. H., Khan I. A. Comparative fatty acid content of seeds of four *Curcubita* species grown in a common (shared) garden. *Journal of Food Composition and Analysis*, **2006**, 19, 606-611.
35. Al-Khalifa A. S. Physicochemical characteristics, fatty acid composition, and lipoxygenase activity of crude pumpkin and melon seed oils. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, **1996**, 44, 964-966.
36. Alves R. C., Casal S., Alves M. R., Oliveira M. B. P. P. Discrimination between arabica and robusta coffee species on the basis of their tocopherol profiles. *Food Chemistry*, **2009**, 114, 295-299.

37. Alves R. C., Casal S., Oliviera M. B. P. P. Tocopherols in coffee brews: influence of coffee species, roast degree and brewing procedure. *Journal of Food Composition and Analysis*, **2010**, 23, 802-808.
38. Rubayiza A., Meurens M. Chemical discrimination of Arabica and robusta coffees by Fourier transform Raman spectrometry. *J. Agric. Food Chem.*, **2005**, 53, 4654-4659.
39. Speer K., Kolling-Speer I. The lipid fraction of the coffee bean. *Braz. J. Plant Physiol.*, **2006**, 18, No.1.
40. Dussert S., Laffargue A., De Kochko A., Joët T. Effectiveness of the fatty acid and sterol composition of seeds for the chemotaxonomy of *Coffea* Subgenus *Coffea*. *Phytochemistry*, **2008**, 69, 2950-2960.
41. Bertrand B., Villareal D., Laffargue A., Posada H., Lashermes P., Dussert S. Comparison of the effectiveness of fatty acids, chlorogenic acids, and elements for the chemometric discrimination of coffee (*Coffea Arabica* L.) varieties and growing origins. *J. Agric. Food Chem.*, **2008**, 56, 2273-2280.
42. Serra F., Guillou C. G., Reniero F., Ballarin L., Cantagallo M. I., Wieser M. Iyer S. S., Héberger K., Vanhaecke F. Determination of the geographical origin of green coffee by principal component analysis of carbon, nitrogen and boron stable isotope ratios. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, **2005**, 19, 2111-2115.
43. Clark R. J., Macrae R. *Coffee Volume 1: Chemistry Vol 1*. Ed. Elsevier Applied Science Publishers, London, U.K., New York, U.S.A., **1985**.
44. Martin M. J., Pablos F., Gonzalez A. G. Discrimination between arabica and robusta green coffee varieties according to their chemical composition. *Talanta*, **1998**, 46, 1259-1264.
45. Baumann T. W., Sondahl M. R., Waldhauser S. S. M., Kretschmar J. A. Non-destructive analysis of natural variability in bean caffeine of Laurina coffee. *Phytochemistry*, **1998**, 49, 1569-1573.
46. Charrier A., Berthaud J. Variation de la teneur en caféine dans le genre *Coffea*. *Café, Cacao, Thé*, **1976**, 19, No.4.
47. Bertrand B., Etienne H., Lashermes P., Guyot B., Davrieux F. Can near-infrared reflectance of green coffee be used to detect introgression in *Coffea arabica* cultivars. *Journal of the Science of Food Agriculture*, **2005**, 85, 955-962.
48. Leroy T., Ribeyre F., Bertrand B., Charmetant P., Dufour M., Montagnon C., Marraccini P., Pot D. Genetics of coffee quality. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, **2006**, 18, No.1.
49. Moreira R. F. A., Trugo L. C., De Maria C. A. B., Matos A. G. B., Santos S. M., Leite J. M. C. Discrimination of Brazilian Arabica green coffee samples by chlorogenic acid composition. *Organo Oficial de la Sociedad Latinoamericana de Nutricion*, **2001**, 51, No.1.
50. Farah A., De Paulis T., Moreira D. P., Trugo L. C., Martin P. R. Chlorogenic acids and lactones in regular and water-decaffeinated Arabica coffees. *J. Agric. Food Chem.*, **2006**, 54, 374-381.
51. Moon J. K., Yoo H. S., Shibamoto T. Role of roasting conditions in the level of chlorogenic acid content in coffee beans: correlation with coffee acidity. *J. Agric. Food Chem.*, **2009**, 57, 5365-5369.
52. Perrone D., Farah A., Donangelo C. M., De Paulis T., Martin P., R. Comprehensive analysis of major and minor chlorogenic acids and lactones in economically relevant Brazilian coffee cultivars. *Food Chemistry*, **2008**, 106, 859-867.
53. Mongrand S., Badoc A., Patouille B., Lacomblez C., Chavent M., Bessoule J. J. Chemotaxonomy of the Rubiaceae family based on leaf fatty acid composition. *Phytochemistry*, **2005**, 66, 549-559.
54. Ky C. L., Louarn J., Guyot B., Charrier A., Hamon S., Noirot M. Relations between and inheritance of chlorogenic acid contents in a interspecific cross between *Coffea pseudozanguebariae* and *Coffea liberica* var "dewevrei". *Theror. Appl. Genet.*, **1999**, 98, 628-637.

55. Martin M. J., Pablos F., Gonzalez A. G., Valdenebro M. S., Leon-Camacho M. Fatty acid profiles as discriminant parameters for coffee varieties differentiation. *Talanta*, **2001**, 54, 291-297.
56. Baggenstoss J., Poisson L., Kaegi R., Perren R., Escher F. Coffee roasting and aroma formation: application of different time-temperature conditions. *J. Agric. Food Chem.*, **2008**, 56, 5836-5846.
57. Pittia P., Della Rosa M., Lerici C. R. Textural changes of coffee beans as affected by roasting conditions. *Lebensm. Wiss. Technol.*, **2001**, 34, 168-175.
58. Sivetz M., Desrosier N. *Coffee Technology*. Ed. Westport, Conn., AVI Publ. Co., **1979**.
59. Dutra E. R., Oliviera L. S., France A. S., Ferraz A. S., Afonso R. J. C. F. A preliminary study on the feasibility of using the composition of coffee roasting exhaust gas for the determination of the degree of roast. *Journal of Food Engineering*, **2001**, 47, 241-246.
60. Ortola M.D., Londono L., Gutierrez C. L., Chiralt A. Influence of roasting temperature on physicochemical properties of different coffees. *Food Science and Technology International*, **1998**, 4, 59-66.
61. Shenker S., Handshin S., Frey B., Perren R., Escher F. Pore structure of coffee beans affected by roasting conditions. *Journal of Food Science*, **2000**, 65, 452-457.
62. Bekedam E; K., Loots M. J., Shols H. A., Van Boekel M. A. J. S., Smit G. Roasting effects of formation mechanisms of coffee brew melanoidins. *J. Agric. Food Chem.*, **2008**, 56, 7138-7145.
63. Bekedam E; K., Roos E., Shols H. A., Van Boekel M. A. J. S., Smit G. Low molecular weight melanoidins in coffee brew. *J. Agric. Food Chem.*, **2008**, 56, 4060-4067.
64. De Maria C. A. B., Trugo L. C., Aquino Neto F. R., Moreira R. F. A., Alviano C. S. Composition of green coffee water-soluble fractions and identification of volatiles during roasting. *Food Chemistry*, **1996**, 55, 203-207.
65. Murkovic M., Bornik M. A. Formation of 5-hydroxymethyl-2-furfural (HMF) and 5-hydroxymethyl-2-furoic acid during roasting of coffee. *Molecular Nutrition and Food Research*, **2007**, 51, 390-394.
66. Perez Locas C., Yaylayan V. A. Isotope labeling studies on the formation of 5-(hydroxymethyl)-2-furaldehyde (HMF) from sucrose by pyrolysis-GC/MS. *J. Agric. Food Chem.*, **2008**, 56, 6717-6723.
67. De Maria C. A. B., Trugo L. C., Aquino Neto F. R., Moreira R. F. A., Alviano C. S. The GC/MS identification of volatiles formed during the roasting of high molecular mass aroma precursors. *J. Braz. Chem. Soc.*, **1995**, 7, 267-270.
68. Yeretizian C., Jordan A., Badoud R., Lindinger W. From the green bean to the cup of coffee: investigating coffee roasting by on-line monitoring of volatiles. *Eur. Food Res. Technol.*, **2002**, 214, 92-104.
69. Paulig R. Coffee composition and method of making the same. European Patent. Gilvaria Oy. *EP: 1715751*, **2009**.
70. Mendes L. C., Menezes H. C. Aparecida M., Da Silva A. P. Optimization of the roasting of robusta (*C. canephora* conillon) coffee using acceptability tests and RSM. *Food Quality and Preference*, **2001**, 12, 153-162.
71. Mayer F., Czerny M., Grosch W. Influence of provenance and roast degree on the composition of potent odorants in arabica coffees. *Eur. Food Res. Technol.*, **1999**, 209, 242-250.
72. Wasserman G. S., Rerngsamai N., Hayes D. F., Mofford E. F., Dabdoub C. Roasted coffee and coffee roasting method. Kraft Foods North America, INC. *Patent N° US 6,207,211*, **2001**.
73. Wasserman G. S., Rerngsamai N., Hayes D. F., Mofford E. F., Dabdoub C. Roasted coffee and coffee roasting method. *European Patent EP 1038445*, **2005**.

74. Nagaraju V. D., Murthy C. T., Ramalakshmi K., Rao P. N. S. Studies on roasting of coffee beans in a spouted bed. *Journal of Food Engineering*, **1997**, 31, 263-270.
75. Clauzure A. Process for roasting coffee. United State Patent. Ricard Pernod, Paris, France. *Patent number: 5773065*, **1998**.
76. Czerny M., Mayer F., Grosch W. Sensory study on the character impact odorants of roasted Arabica coffee. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **1999**, 47, 695-699.
77. Akiyama M., Murakami K., Hirano Y., Ikeda M., Iwatsuki K., Wada A., Tokuno K., Onishi M., Iwabuchi H. Characterization of headspace aroma compounds of freshly brewed Arabica coffees and studies on a characteristic aroma compound of Ethiopian coffee. *Food Chemistry*, **2008**, 73, 335-346.
78. Czerny M., Grosch W., Potent odorants of raw Arabica coffee. Their changes during roasting. *J. Agric. Food Chem.*, **2000**, 48, 868-872.
79. Holscher W., Steinhart H. *Aroma compounds in green coffee*. Ed. Food Flavors-Generation, Analysis and Process Influence. Elsevier Science, **1995**, 785-803.
80. Sanz C., Ansorena D., Bello J., Cid C. Optimizing headspace temperature and time sampling for identification of volatile compounds in ground roasted arabica coffee. *J. Agric. Food Chem.*, **2001**, 49, 1364-1369.
81. Mondello L., Costa R., Tranchida P. Q., Dugo P., Lo Presti M., Festa S., Fazio A., Dugo G. Reliable characterization of coffee bean aroma profiles by automated headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry with the support of a dual-filter mass spectra library. *J. Sep. Sci.*, **2005**, 28, 1101-1109.
82. Ryan D., Shellie R., Tranchida P., Casilli A., Mondello L., Marriott P. Analysis of roasted coffee volatiles by using comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, **2004**, 1054, 57-65.
83. Semmelroch P., Grosch W. Studies on character impact odorants of coffee brews. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **1996**, 44, 537-543.
84. Suslick B. A., Feng L., Suslick K. S. Discrimination of complex mixtures by a colorimetric sensor array: coffee aromas. *Anal. Chem.*, **2010**, 82, 2067-2073.
85. Steffen A., Pawliszyn J. Analysis of flavor volatiles using headspace solid-phase microextraction. *J. Agric. Food Chem.*, **1996**, 44, 2187-2193.
86. Urruty L., Montury M. Influence of ethanol on pesticide extraction in aqueous solutions by solid-phase microextraction. *J. Agric. Food Chem.*, **1996**, 44, 3871-3877.
87. Clark T. J., Bunch J. E. qualitative and quantitative analysis of flavor additives on tobacco products using SPME-GC-Mass spectrometry. *J. Agric. Food Chem.*, **1997**, 45, 844-849.
88. Moore S. J., Godshall M. A., Grimm C. C. Comparison of two methods of volatile analysis for determining the causes of off-odors in white beet sugars SPME and headspace. *Int. Sugar J.*, **2003**, 105, 1253, 224-229.
89. Grimm C. C., Bergman C., Delgado J. T., Bryant R. Screening for 2-acetyl-1-pyrroline in the headspace of rice using SPME/GC-MS. *J. Agric. Food Chem.*, **2001**, 49, 245-249.
90. Bicchi C. P., Panero O. M., Pellegrino G. M., Vanni A. C. Characterization of roasted coffee and coffee beverages by solid phase microextraction-gas chromatography and principal component analysis. *J. Agric. Food Chem.*, **1997**, 45, 4680-4686.
91. Korhonova M., Hron K., Klimcikova D., Muller L., Bednar P., Bartak P. Coffee aroma-statistical analysis of compositional data. *Talanta*, **2009**, 80, 710-715.

92. Gonzalez-Rios O., Suarez-Quiroz M., Boulanger R., Barel M., Guyot B., Guirand J. P., Schorr-Galindo S. Impact of “ecological” post-harvest processing on coffee aroma: II. Roasted coffee. *Journal of Food Composition and Analysis*, **2007**, 20, 289-296.
93. Kim K. J., Nam M. W. SPME technology and its application in the coffee industry. *20th International Conference on Coffee Science*, **2004**.
94. Banks M., McFadden C., Atkinson C. *The world encyclopedia of coffee*. Ed. Anness Publishing Limited, London, **1999**.
95. Jung M. Y., Bock J. Y., Baik S. O., Lee J. H., Lee T. K. Effects of roasting on pyrazine contents and oxidative stability of red pepper seed oil prior to its extraction. *J. Agric. Food Chem.*, **1999**, 47, 1700-1704.
96. Hashim L., Chaveron H. Use of methylpyrazine ratios to monitor the coffee roasting. *Food Research International*, **1996**, 28, 619-623.
97. Charles-Bernard M., Kraehenbuehl K., Rytz A., Roberts D. Interactions between volatile and nonvolatile coffee components. 1. Screening of non-volatile components. *J. Agric. Food Chem.*, **2005**, 53, 4417-4425.
98. Buffo R. A., Cardelli-Freire C. Coffee flavor: an overview. *Flavour and Fragrance Journal*, **2004**, 19, 99-104.
99. Hennion M-L. Solid-phase extraction: development, sorbents and coupling with liquid chromatography. *Journal of Chromatography A*. **1999**, 24, 3-54.
100. Mottaleb M. A., Abedin M. Z., Islam M. S. Determination of volatile organic compounds in river water by solid phase extraction and gas chromatography. *Journal of Environmental Sciences*. IOS Press, **2005**, 497-501.
101. Shakulashvili N., Revia R., Steiner F., Engelhardt H. Simultaneous determination of various classes of pesticides using micellar electrokinetic capillary chromatography in combination with solid-phase extraction. *Chromatographia*, **2004**, 60, 145-150.
102. Utvik T. I. R., Durell G., Johnsen S. Determining produced water originating polycyclic aromatic hydrocarbons in north sea waters: comparison of sampling techniques. *Marine Pollution Bulletin*, **1999**, 38, 977-989.
103. Andujar-Ortiz I., Moreno-Arribas M. V., Martin-Alvarez P. J., Pozo-Bayon M. A. Analytical performance of three commonly used extraction methods for the gas-chromatography spectrometry analysis of wine volatile compounds. *Journal of Chromatography A*, **2009**, 1216, 7351-7357.
104. Ibarz M. J., Ferreira V., Hernandez-Orte P., Loscos N., Cacho J. Optimization and evaluation of a procedure for the gas chromatography-mass spectrometric analysis of the aromas generated by fast acid hydrolysis of flavor precursors extracted from grapes. *Journal of Chromatography A*, **2006**, 1116, 217,229.
105. Ferreira V., Jarauta I., Ortega L., Cacho J. Simple strategy for the optimization of solid-phase extraction procedures through the use of solid-liquid distribution coefficients: application to the determination of aliphatic lactones in wine. *Journal of Chromatography A*, **2004**, 1025, 147-156.
106. Aznar M. Analysis of wine volatile profile by purge-and-trap-gas chromatography-mass spectrometry: application to the analysis of red and white wines from different Spanish regions. *Journal of Chromatography A*, **2007**, 1017, 17-26.
107. Solis-Solis H. M., Calderon-Santoyo M., Schorr-Galindo S., Luna-Solano G., Ragazzo-Sanchez J. A. Characterization of aroma potential of apricot varieties using different extraction techniques. *Food Chemistry*, **2007**, 105, 829-837.
108. Chinnici F., Guerrero E. D., Sonni F., Natali N., Marin R. N., Riponi C. Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) characterization of volatile compounds in quality nivegars with protected European Geographical Indication. *J. Agric. Food Chem.*, **2009**, 57, 4784-4792.

109. Tschiggerl C., Bucar F. Investigation of the volatile fraction of Rosemary infusion extracts. *Sci. Pharm.*, **2010**, 78, 483-492.

110. Ribeiro J. S., Augusto F., Salva T. J. G., Thomaziello R. A., Ferreira M. M. C. Prediction of sensory properties of brazilian Arabica roasted coffees by headspace solid phase microextraction-gas chromatography and partial least squares. *Analytical Chimica Acta*, **2009**, 634, 172-179.

Chapitre III

Caractérisation des catégories commerciales du café « Bourbon Pointu »



Introduction

En 2004, un des plus importants acheteurs de café du Royaume-Uni prétendait que ce commerce était comparable à celui du vin des années 1990 [1]. D'un produit générique à l'origine, certains y associent maintenant les notions de terroir et de cru. Le Kalossi des Célèbes, le Yrgachette d'Ethiopie, l'Antigua du Guatemala ou le Blue Mountain de Jamaïque figurent parmi les meilleurs crus au monde et peuvent être classés parmi les «specialty coffee» ou «café gourmet». La classification d'un café parmi les «café gourmet» repose en partie sur l'analyse sensorielle de la tasse du café torréfié par un panel d'experts [2, 3, 4] qui définissent les caractéristiques organoleptiques (corps, amertume, acidité, fruité...) propres au produit.

Cependant, la négoce du café concerne aussi bien des grains verts que des grains torréfiés et contrairement au vin, le café vert ou torréfié n'est pas un produit fini. Il importe donc à la Specialty Coffee Association of America (SCAA) de garantir que la qualité d'un café vert associé à un profil de torréfaction et à un mode de préparation de la tasse de café conduise à une qualité sensorielle en tasse optimale et originale.

Depuis la mise en place de la filière à La Réunion, la dégustation du café « Bourbon Pointu » suscite de nombreux espoirs. Il a été classé en 2006 dans la catégorie des « premiums coffee » par l'association des specialty coffee of Japan (SCAJ) et a été considéré en 2007 par des connaisseurs New-Yorkais dont un ex-Président de la Specialty Coffee Association of America, lors d'une dégustation à l'aveugle, comme un produit fabuleux avec des notes fruitées, un corps, une persistance du goût et ayant une faible teneur en caféine [5]. Ce résultat a fait du « Bourbon Pointu » le café le plus cher au monde devant le Blue Mountain, son prix au kilogramme étant de 460 Euros.

Il est donc primordial dans le cadre du développement de cette filière de définir des outils de prédiction permettant d'établir un lien direct entre la qualité du café vert et la qualité à la tasse en établissant des corrélations entre :

- La composition chimique du café vert et la qualité organoleptique,
- La composition aromatique du café à la tasse et la qualité organoleptique,
- La composition chimique du café vert, la composition aromatique du café à la tasse et la qualité organoleptique.

1 - La segmentation commerciale et qualitative du « Bourbon Pointu »

1.1. Critères de classification

Trois catégories commerciales de cafés (Grand Cru, Sublime et Authentique) sont définies à partir des critères de qualité reportés dans le tableau XXIV. La catégorie « Grand cru » est le produit de qualité maximale. Tout café n'appartenant à aucune de ces trois catégories est dénommé « café Triage » et n'est pas commercialisé.

Tableau XXIV
Critères de classification du café « Bourbon Pointu ».

Caractéristiques	Grand cru	Sublime	Authentique
Défauts primaires	Aucun	Aucun	Total de 60 maximum (300 grammes de café vert)
Défauts secondaires	15 maximum (300 grammes de café vert)	30 maximum (300 grammes de café vert)	
Nombre d'attributs distinctifs de saveur et d'arôme	Au moins 1		Aucun
Qualité aromatique	Moyenne à forte : note $\geq 3,0/5$	Moyenne : note $\geq 2,85/5$	Moyenne : Note $\geq 2,75/5$
Persistance en bouche	Moyenne : Note $\geq 2,5/5$		Moyenne à forte: $2,5/5 \leq \text{Note} \leq 3,5/5$
Acidité	Faible à moyenne : $2,25/5 \leq \text{Note} \leq 3,25/5$	Faible à moyenne : $1,75/5 \leq \text{Note} \leq 3,25/5$	Faible à moyenne : $1,75/5 \leq \text{Note} \leq 3,5/5$
Corps	Moyen : $2,5/5 \leq \text{Note} \leq 3,25/5$	Faible à moyen : $2,0/5 \leq \text{Note} \leq 3,25/5$	
Fruité	Moyen à prononcé : Note $\geq 2,0/5$	Faible : Note $\geq 1,25/5$	
Saveur bonifiante	Au moins 1	Aucune	
Rapport acidité/amertume (équilibre de la tasse)	$1 \leq \text{acidité/amertume} \leq 1,5$		
Note de préférence	Bonne à très bonne : Note $\geq 3,5/5$	Bonne : Note $\geq 3,0/5$	Bonne : Note $\geq 2,75/5$

1.2. Catégorisation des échantillons des campagnes de récolte 2006 et 2007

1.2.1. Analyse sensorielle des cafés boissons issus des échantillons torréfiés

Les cafés boissons issus des 216 échantillons (soit 108 par année) ont été évalués sensoriellement par un panel d'experts. Sur la base de la grille d'évaluation donnée dans le tableau XXIV, ils ont été classés en quatre catégories : Grand cru, Sublime, Authentique, Triage.

L'examen des résultats des analyses sensorielles montre que la moyenne de toutes les notes attribuées aux descripteurs sensoriels par les dégustateurs ont mis en évidence une large différence organoleptique entre les catégories « Grand cru » et « Triage » et le positionnement intermédiaire des catégories « Sublime » et « Authentique » comme nous le montre la figure 21. Les résultats des tableaux XXV et XXVI révèlent que la catégorie « Grand cru » regroupe les cafés ayant obtenu les meilleures notes à la fois selon le critère de « préférence » et de descripteurs positifs (fruité, qualité aromatique, acide, corps) alors que les cafés appartenant à la catégorie « Triage » ont obtenus les notes les plus élevées pour les descripteurs négatifs (âpre, astringent, amer), ces différences étant significatives au seuil de 5%. Concernant les deux autres catégories commerciales, les cafés de la catégorie « Sublime » recueillent de meilleures notes pour les descripteurs « intensité aromatique », « qualité aromatique », « fruité » et « préférence » que ceux des cafés issus de la catégorie « Authentique » dont les notes sont plus élevées pour les autres descripteurs. Ces différences de notes entre ces deux catégories sont significatives au seuil de 5%, excepté pour la « persistance ». Il est à noter que les différences significatives entre toutes les notes des descripteurs obtenues par les cafés issus des quatre catégories confirment la particularité organoleptique de chacune d'elles.

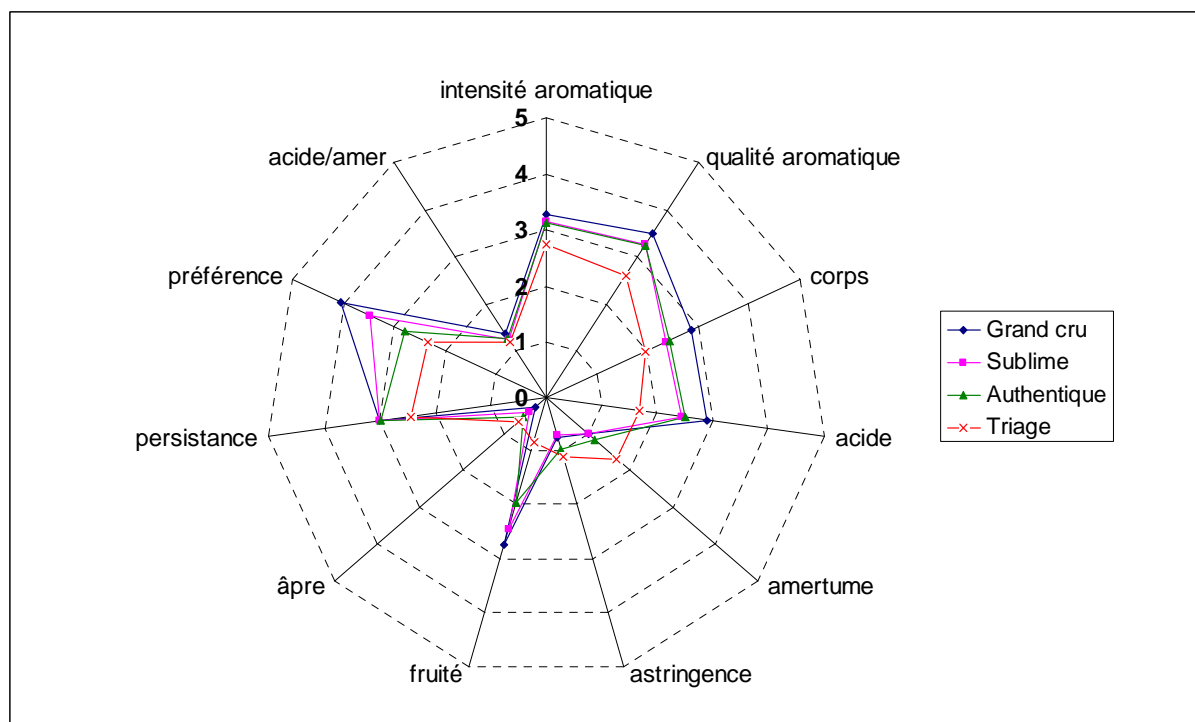


Figure 21 : Profils sensoriels des catégories commerciales et non commerciale de café (notes comprises entre 0 et 5).

Tableau XXV

Moyenne des notes des descripteurs pour les catégories commerciales et non commerciale de café.

	int. arôme	qual. arôme	corps	acide	amer.	astr.	fruité	âpre	persistance	préférence	acide/amer
Gr.	3,27 ±0,5	3,50 ±0,4	2,84 ±0,2	2,88 ±0,5	1,00 ±0,2	0,74 ±0,2	2,73 ±0,2	0,26 ±0,1	3,00 ±0,5	4,05 ±0,4	1,35 ±0,2
Su.	3,15 ±0,4	3,26 ±0,4	2,35 ±0,4	2,44 ±0,2	1,00 ±0,2	0,69 ±0,2	2,43 ±0,4	0,38 ±0,1	2,99 ±0,2	3,46 ±0,5	1,22 ±0,2
Au.	3,12 ±0,5	3,23 ±0,5	2,41 ±0,4	2,51 ±0,4	1,15 ±0,2	0,96 ±0,2	1,96 ±0,2	0,55 ±0,1	2,98 ±0,5	2,78 ±0,4	1,25 ±0,2
Tri.	2,73 ±0,4	2,61 ±0,2	1,97 ±0,2	1,68 ±0,2	1,67 ±0,2	1,10 ±0,2	0,82 ±0,2	0,67 ±0,1	2,43 ±0,2	2,33 ±0,4	1,18 ±0,2

Tableau XXVI

Différences significatives des notes des descripteurs au seuil de 5% entre les trois catégories commerciales et la catégorie non commerciale.

Catégories	int. arôme	qual. arôme	corps	acide	amer.	astr.	fruité	âpre	persistance	préférence	acide/amer
Grand cru vs Sublime	S	S	S	S	NS	S	S	S	NS	S	S
Grand cru vs Authentique	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Grand cru vs Triage	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Sublime vs Authentique	S	S	S	S	S	S	S	S	NS	S	S
Sublime vs Triage	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Authentique vs Triage	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S

1.2.2. Répartition des échantillons dans les différentes catégories

Plus de 85% des échantillons pour les deux années confondues sont des cafés commercialisables comme le montre le tableau XXVII. Le nombre de cafés « Grand cru » a augmenté de 50% entre 2006 et 2007 en passant de 18 à 27 unités. Cette croissance s'accompagne d'une faible diminution de cafés issus des deux autres catégories commerciales laissant supposer un passage dans la catégorie supérieure de ces cafés entre 2006 et 2007.

Tableau XXVII
Répartition des 216 échantillons dans les catégories commerciales et non commerciale.

	Cafés commercialisés				Proportion des cafés commercialisés (%)	Total des échantillons
	Grand cru	Sublime	Authentique	Triage		
Part en %	20,8	30,6	34,7	13,9	86,1	216
2006 (unité)	18	39	39	12	88,9	108
2007 (unité)	27	27	36	18	83,3	108

Une analyse plus approfondie de la répartition dans les classes en fonction de l'origine (zone géographique, altitude, traitement post-récolte) des 216 échantillons de café a été réalisée et est reportée dans le tableau XXVIII. Les échantillons de café répartis sur 9 caféières distinctes ont été choisis suivant une zone de l'île : (Nord : N ; Centre : C ; Sud : S), selon une catégorie d'altitude (classe d'altitude 3 : < 650 mètres ; 2 : < 850 mètres ; 1 : < 1000 mètres). Ils ont ensuite subi une transformation post-récolte par voie humide déclinée en quatre variantes (A ; E ; G ; C).

Tableau XXVIII
Répartition des cafés étudiés et de leurs paramètres pédoclimatiques par catégorie commerciale.

	Cafés commercialisés				Proportion des cafés commercialisés (%)	Total des échantillons
	Triage	Grand cru	Sublime	Authentique		
Part en %	13,9	20,8	30,6	34,7	86,1	216
2006	12	18	39	39	88,9	108
2007	18	27	27	36	83,3	108
Transformation post-récolte						
A	0	21	33	0	100	54
C	0	24	30	0	100	54
E	12	0	3	39	77,8	54
G	18	0	0	36	66,7	54
Classe d'altitude						
1	0	27	12	33	100	72
2	9	15	21	27	87,5	72
3	21	3	33	15	70,8	72
Zone de l'île						
C	9	21	15	27	87,5	72
N	15	12	27	18	79,2	72
S	6	12	24	30	91,7	72
N° de caféière						
12	0	12	3	9	100	24
29	3	12	0	9	87,5	24
34	0	9	3	12	100	24
66	6	6	6	6	75	24
49	6	3	9	6	75	24
57	0	3	9	12	100	24
5	6	0	12	6	75	24
9	6	0	12	6	75	24
102	9	0	12	3	62,5	24

D'après le tableau XXVIII, pour les deux années de récolte, les deux catégories les plus éloignées en terme de qualité aromatique regroupent des cafés ayant des paramètres pédoclimatiques très différents entre eux.

En effet, la catégorie « Grand cru » est constituée de cafés ayant subi les transformations A et C appartenant principalement aux caféières 12, 29, 34 à l'altitude 1 et 2 et situées majoritairement dans la zone C de l'île.

La catégorie Triage comprend des cafés ayant subi les transformations E et G appartenant essentiellement à la caféière 102 à l'altitude 3 et située majoritairement dans la zone N de l'île.

Il est intéressant de noter que les cafés classés dans les trois catégories commerciales ont des paramètres particuliers :

- Tous les cafés ayant subi une transformation post-récolte A ou C sont tous des cafés commercialisés, il en est de même pour tous les cafés issus de la classe d'altitude 1 comprise entre 850 et 1000 mètres.

- Les cafés issus des caféières 12, 34, 57 sont tous des cafés commercialisés. Cependant, comme le montre le tableau XXIX, les cafés issus de ces caféières proviennent des trois zones d'échantillonnage, ils sont issus uniquement de la classe d'altitude 1 ou 2 mais ont subi les quatre type de transformations post-récolte

Tableau XXIX
Paramètres pédoclimatiques et types de transformations subies des cafés étudiés.

Numéro de caféière	Zone de l'île	Classe d'altitude	Type de transformations subies
12	N	1	A, C, E, G
34	C	1	A, C, E, G
57	S	2	A, C, E, G

Il était donc impératif d'évaluer l'influence de la combinaison des paramètres (Zone, altitude, traitement post-récolte) sur la composition chimique des échantillons de cafés et d'établir le lien avec le classement en café « Grand cru », « Sublime », « Authentique ».

2 - Corrélation entre la composition des cafés verts et les différentes catégories

2.1. Caractérisation biochimique des différentes catégories

Les moyennes des concentrations des différents composés biochimiques des différentes catégories commerciales et non commerciale ont été comparées entre elles (seuil de risque : 5%) et les résultats sont reportés dans le tableau XXX.

Tableau XXX
Moyenne des concentrations des composés biochimiques en % de matière sèche pour les trois catégories commerciales et la non commerciale.

Composition	Grand Cru	Sublime	Authentique	Triage	Cafés commercialisés	Grand Cru et Triage ¹	Cafés commercialisés et Triage ²
matière grasse totale	15,09 ± 0,38	14,15 ± 0,68	14,58 ± 0,53	13,93 ± 0,25	14,55 ± 0,66	s	s
C16:0	5,31 ± 0,13	4,90 ± 0,25	5,00 ± 0,23	4,79 ± 0,13	5,08 ± 0,27	s	s
C18:0	1,01 ± 0,09	1,01 ± 0,08	1,01 ± 0,08	1,04 ± 0,10	1,01 ± 0,08	ns	ns
C20:0	0,33 ± 0,02	0,34 ± 0,03	0,33 ± 0,03	0,35 ± 0,04	0,33 ± 0,03	s	s
C18:1 n-9	0,98 ± 0,08	1,07 ± 0,13	1,01 ± 0,16	1,12 ± 0,11	1,02 ± 0,14	s	s
C18:2 cc	6,94 ± 0,21	6,27 ± 0,39	6,33 ± 0,40	6,11 ± 0,14	6,58 ± 0,47	s	s
C18:3 n-3	0,27 ± 0,01	0,27 ± 0,01	0,27 ± 0,02	0,26 ± 0,02	0,27 ± 0,02	s	s
FA sat.	6,66 ± 0,16	6,25 ± 0,28	6,44 ± 0,25	6,18 ± 0,15	6,42 ± 0,29	s	s
FA ins.	8,33 ± 0,21	7,6 ± 0,38	7,85 ± 0,32	7,49 ± 0,15	7,88 ± 0,42	s	s
Sucres totaux	7,18 ± 0,50	7,16 ± 0,60	7,32 ± 0,69	6,64 ± 0,76	7,23 ± 0,62	s	s
Saccharose	7,1 ± 0,48	7,1 ± 0,60	7,26 ± 0,69	6,58 ± 0,73	7,16 ± 0,61	s	s
glucose	0,04 ± 0,01	0,05 ± 0,01	0,03 ± 0,02	0,04 ± 0,02	0,04 ± 0,02	ns	ns
fructose	0,03 ± 0,02	0,03 ± 0,03	0,02 ± 0,02	0,03 ± 0,03	0,03 ± 0,02	ns	ns
caféine	0,75 ± 0,01	0,75 ± 0,02	0,75 ± 0,02	0,76 ± 0,02	0,75 ± 0,02	s	s
trigonelline	1,31 ± 0,05	1,35 ± 0,08	1,32 ± 0,08	1,39 ± 0,08	1,33 ± 0,08	s	s
acide caféique	0,01 ± 0,00	0,01 ± 0,00	0,01 ± 0,01	0,01 ± 0,00	0,01 ± 0,00	ns	ns
acides chlorogéniques totaux	6,92 ± 0,51	6,68 ± 0,56	6,96 ± 0,59	6,80 ± 0,46	6,86 ± 0,57	ns	ns
3-CQA	0,28 ± 0,04	0,29 ± 0,04	0,30 ± 0,05	0,32 ± 0,03	0,29 ± 0,04	s	s
5-CQA	4,81 ± 0,36	4,55 ± 0,46	4,82 ± 0,42	4,67 ± 0,38	4,72 ± 0,44	ns	ns
4-CQA	0,49 ± 0,07	0,47 ± 0,09	0,48 ± 0,08	0,54 ± 0,05	0,48 ± 0,08	s	s
5-FQA	0,36 ± 0,08	0,35 ± 0,06	0,37 ± 0,06	0,35 ± 0,05	0,36 ± 0,07	ns	ns
3,4-diCQA	0,12 ± 0,02	0,15 ± 0,03	0,15 ± 0,03	0,15 ± 0,03	0,15 ± 0,03	ns	ns
3,5-diCQA	0,65 ± 0,09	0,60 ± 0,10	0,6 ± 0,10	0,6 ± 0,06	0,61 ± 0,10	s	ns
4,5-diCQA	0,24 ± 0,05	0,23 ± 0,06	0,24 ± 0,06	0,21 ± 0,06	0,24 ± 0,06	s	s

^{1,2} Différences significatives de la moyenne des concentrations des composés biochimiques au seuil de risque de 5%.

D'après le tableau XXX, les cafés classés dans les catégories commerciales sont plus riches en matière grasse totale (+ 4,4 %), en sucres totaux (+ 8,8 %) et en acides chlorogéniques totaux (+0,8 %) que les cafés classés dans la catégorie non commerciale « Triage ». Plus précisément, dans la classe chimique de la matière grasse, la teneur totale des acides gras saturés et celle des acides gras insaturés sont plus élevées (+ 5 %) pour les cafés commercialisés par rapport aux cafés « Triage ». De même, dans la classe des acides chlorogéniques, les teneurs moyennes de leurs composés biochimiques sont supérieures pour les cafés commercialisés, excepté pour les isomères 3-CQA et 4-CQA. Des teneurs identiques ont été mesurées pour le glucose et le fructose entre les cafés commercialisés et les cafés de la catégorie non commerciale.

En revanche, la teneur en trigonelline des cafés de la catégorie non commerciale est supérieure à celle des cafés commercialisés avec pour les commercialisés, une teneur de l'ordre de 1,33 % (matière sèche) et de 1,39% (matière sèche) pour les cafés « Triage », soit une différence d'environ 5 %.

D'ores et déjà, ces résultats, sur la composition biochimique des cafés commercialisés ou non, sont en partie corroborés avec les résultats issus de la comparaison des profils sensoriels des quatre catégories de la figure 21. En effet, la teneur plus élevée pour les cafés commercialisés en matière grasse totale est en parfait accord avec la prédominance du « corps » dans ces cafés. De même que la teneur plus élevée en sucres totaux pour les cafés commercialisés s'harmonise avec les moyennes des notes plus élevées en terme de « qualité aromatique » et de « fruité », obtenues par ces derniers. Enfin, la teneur plus élevée en acides chlorogéniques totaux est en partie responsable du caractère plus acide des cafés commercialisés par rapport aux cafés classés dans la catégorie non commerciale [6].

Une ANOVA a été ensuite réalisée afin de déterminer les composés biochimiques dont les teneurs seraient significativement différentes au seuil de risque 5% entre les quatre catégories. Les résultats de l'ANOVA du tableau XXX montre que les teneurs en C18:0, glucose, fructose, de la classe des acides chlorogéniques totaux et ses composés exceptés le 3-CQA, le 4-CQA et le 4,5-diCQA ne sont pas significativement différentes au seuil de risque 5% entre les quatre catégories. Les composés biochimiques qui différencient les catégories commerciales ont été utilisés dans la suite de notre étude.

2.2. Discrimination des quatre catégories en fonction des composés biochimiques retenus

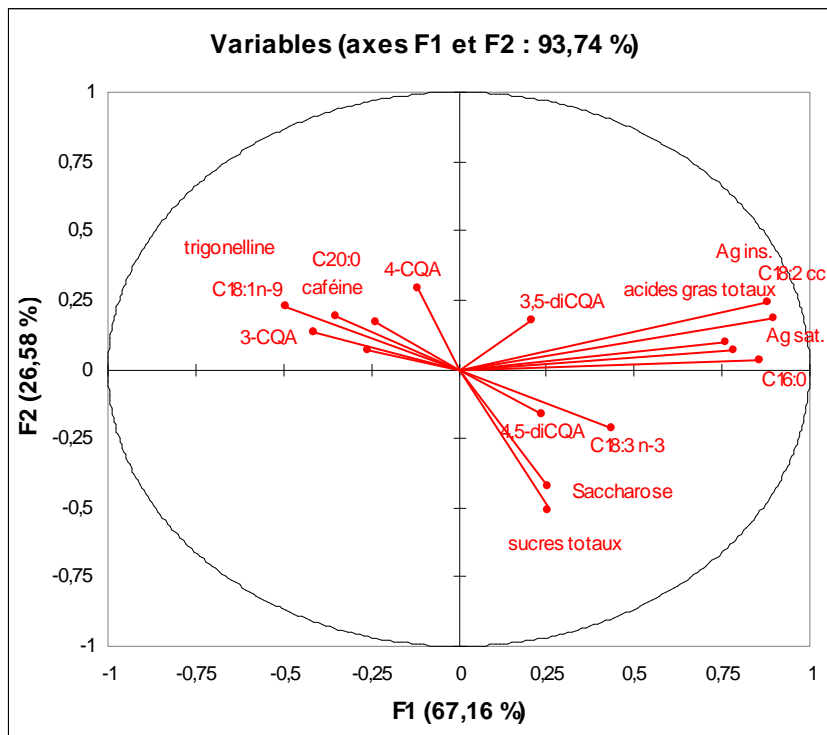
Dans le but de discriminer les catégories commerciales par rapport aux composés biochimiques qui sont significativement différentes au seuil de risque 5% entre les catégories (cf. Tableau XXX), une AFD a été réalisée en répartissant les 216 échantillons sous leurs trois dénominations commerciales (Gd = Grand Cru ; M1 = Sublime ; M2 = Authentique), la dénomination non commerciale (Tr = Triage) et comme variables quantitatives, la teneur de ces composés biochimiques de chaque échantillon. Quatre groupes d'individus sont ainsi pré-définis. Le tableau XXXI donne les contributions des composés aux composantes F1 et F2.

Tableau XXXI
Contribution des différentes variables aux composantes F1 et F2 de l'AFD réalisée sur nos échantillons de café « Bourbon Pointu » classés dans leur catégorie respective.

Composés	F1	F2
acides gras totaux	0,784	0,070
C16:0	0,857	0,033
C20:0	-0,352	0,194
C18:1 n-9	-0,415	0,131
C18:2 cc	0,896	0,187
C18:3 n-3	0,433	-0,216
Ag sat.	0,760	0,095
Ag ins.	0,880	0,243
saccharose	0,252	-0,424
sucres totaux	0,254	-0,495
trigonelline	-0,493	0,227
caféine	-0,239	0,171
3-CQA	-0,262	0,067
4-CQA	-0,118	0,293
3,5-diCQA	0,207	0,179
4,5-diCQA	0,235	-0,163

L'axe F1 est corrélé positivement et principalement avec la matière grasse totale, les acides gras insaturés et saturés et les acides gras C18:2 cc et C16:0 et négativement avec la trigonelline et l'acide gras C18:1 n-9. Tandis que l'axe F2 est corrélé négativement avec les sucres totaux et le saccharose.

a)



b)

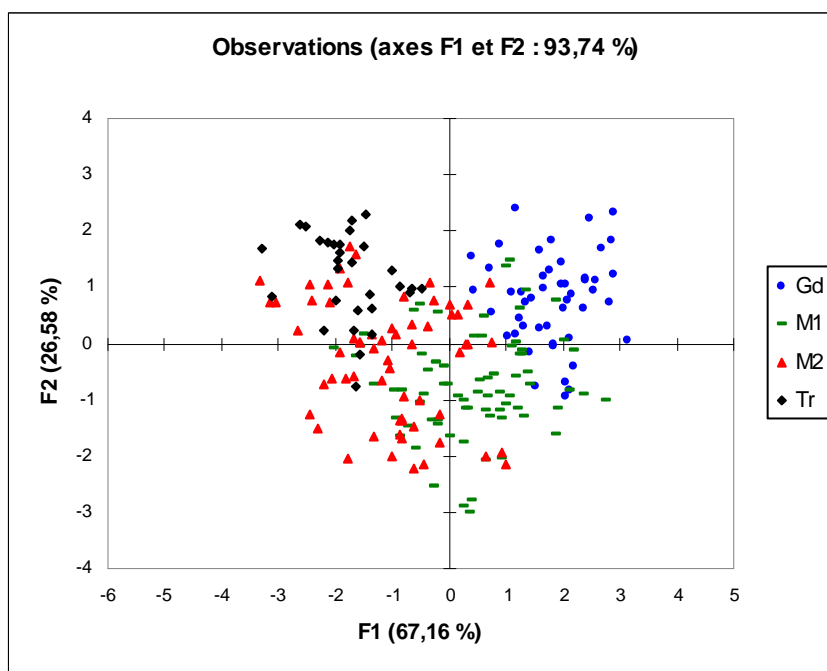


Figure 22 : Représentation graphique de l'analyse factorielle discriminante sur les échantillons du café « Bourbon Pointu ».

- Représentation de la construction des axes 1, 2 et visualisation des vecteurs propres de l'AFD.
- Répartition des individus du café « Bourbon Pointu » sur l'axe 1, 2 de l'AFD.

La représentation graphique des échantillons dans le plan 1, 2 de la figure 22 montre une discrimination complète entre les cafés « Grand Cru » et les cafés « Triage » et un regroupement des deux autres catégories avec, cependant une tendance pour certains cafés « Sublime » à se rapprocher des « Grand Cru » et pour certains cafés « Triage » à se confondre avec des « Authentique ».

D'une part, au niveau de l'axe F1, les catégories « Grand Cru » et « Triage » sont nettement discriminées. Les cafés issus de la catégorie « Grand Cru » ont des teneurs plus élevées en matière grasse totale tandis que les cafés « Triage » ont des teneurs plus élevées en trigonelline et caféine. D'autre part, au niveau de l'axe F2, les cafés des catégories « Sublime » et « Authentique » ont des teneurs plus élevées en sucres totaux et saccharose. Par conséquent, les composés biochimiques qui différencient majoritairement les quatre catégories sont : la matière grasse totale, la trigonelline, la caféine entre « Grand Cru » et « Triage ». Entre « Sublime », « Authentique » et les deux autres catégories, ces composés sont les sucres totaux et le saccharose.

Dans la suite de l'étude, les facteurs influençant ces variations de composition biochimique ont été identifiés. En effet, les échantillons de café répartis sur 9 caféières distinctes ont été choisis suivant une zone de l'île : (Nord : N ; Centre : C ; Sud : S), selon une catégorie d'altitude (classe d'altitude 3 : < 650 mètres ; 2 : < 850 mètres ; 1 : < 1000 mètres). Ils ont ensuite subi une transformation post-récolte par voie humide déclinée en quatre variantes (A ; E ; G ; C).

2.3. Corrélation entre les trois catégories commerciales et les composés biochimiques du café vert

Dans le but d'établir entre les trois catégories commerciales des critères de différenciation au niveau de la composition biochimique du café vert, plusieurs ACP ont été préalablement réalisées afin de sélectionner les composés biochimiques les plus discriminants dans la distinction des trois catégories en retenant les axes dont les valeurs propres représentaient plus de 80% de l'information et les composés biochimiques dont le cosinus carré était supérieur à 0,7. Pour cela, les 186 échantillons renommés suivant leurs 3 modalités pédoclimatiques sous la forme de sigle symbolisé par la zone de l'île (C ou N ou S), la classe d'altitude (1 ou 2 ou 3), le type de transformation post-récolte (A ou E ou C ou G) et leur appartenance à la catégorie commerciale (« g » pour Grand cru, « s » pour Sublime et « a »

pour Authentique) ont été prises comme variables qualitatives. Par exemple, un échantillon situé dans la zone sud à l'altitude 2, ayant subi une transformation post-récolte de type A et appartenant à la catégorie commerciale « Sublime », a été nommé « S2As ». La moyenne des teneurs des composés biochimiques pour chacun des 186 échantillons de café vert a été prise comme variable quantitative. Le tableau XXXII présente la liste des composés biochimiques avec leurs cosinus carrés respectifs retenus pour la suite de l'étude.

Tableau XXXII

Liste des composés retenus pour les 186 échantillons de café analysés et leurs cosinus carrés suivant les axes F1 et F2.

Composés	F1	F2
C16: 0	0,655	0,232
C18: 2 cc	0,709	0,170
glucose	0,297	0,594
3,4-diCQA	0,538	0,072
Σ acides gras / glu.	0,201	0,760
Σ acides chloro. / glu.	0,275	0,673

Par la suite, les éventuels regroupements d'échantillons en fonction des concentrations des composés chimiques retenus ont été recherchés. Pour cela, une classification ascendante hiérarchique a été réalisée en prenant pour variables quantitatives les coordonnées des échantillons issus de la dernière ACP et pour variables qualitatives les échantillons sous leur forme de regroupement. Le premier résultat est l'arbre binaire ou encore le dendrogramme où le regroupement progressif des données peut être visualisé sur la figure 23. L'arbre à un niveau donné a été tronqué à trois regroupements ou classes, ce qui correspondrait aux trois catégories commerciales.

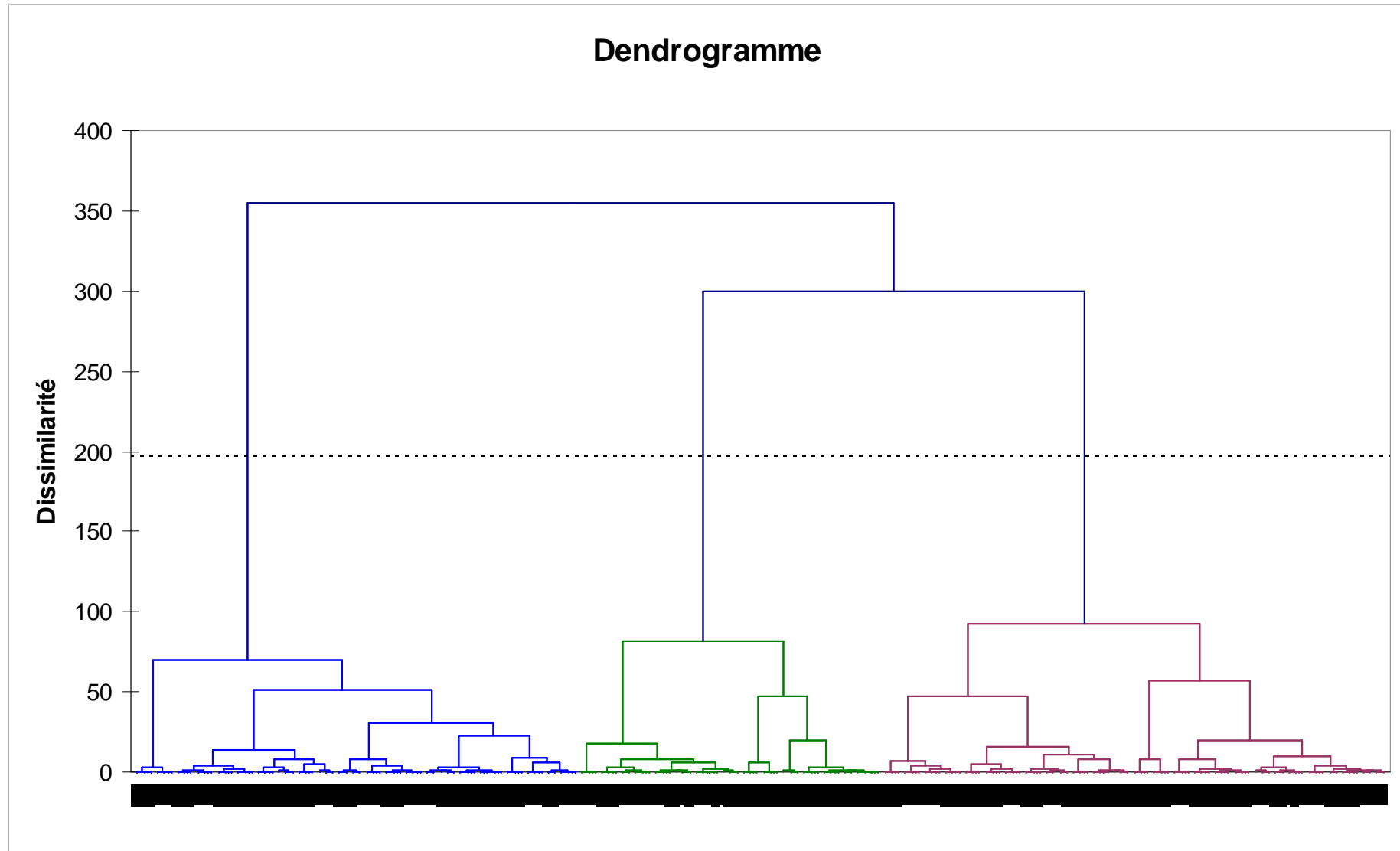


Figure 23 : Dendrogramme de la classification ascendante hiérarchique des échantillons résultant de l'ACP.

Dans le tableau XXXIII, les échantillons ont été rangés dans les trois classes issues de la troncature du dendrogramme tout en reportant la fréquence (dénombrement) de chacune des quatre modalités (Zone, Altitude, Transformation et Catégorie) des regroupements de tous les échantillons dans leur classe respective.

Dans le but d'interpréter les trois classes, un critère de pertinence a été déterminé, il identifie chaque classe en fonction des quatre modalités. Ce critère est la « valeur-test », qui permet de sélectionner les variables nominales, ici les modalités (zone...), les plus caractéristiques de chaque classe. Le calcul de la « valeur-test » pour les quatre modalités est décrit ci-dessous :

	Classe k	Autres classes	Population
Modalité j	n_{kj}	*	n_j
Autres modalités	*	*	*
Population	n_k	*	n

$$v\text{-test} = \frac{n_{jk} - n_k \cdot \frac{n_j}{n}}{\sqrt{n_k \cdot \frac{n - n_k}{n - 1} \cdot \frac{n_j}{n} \cdot \left(1 - \frac{n_j}{n}\right)}}$$

Le tableau XXXIII regroupe le dénombrement et la « valeur-test » de chaque modalité dans les trois classes respectives. Si la valeur absolue de la « valeur-test » est strictement supérieure à 2 alors la proportion de la modalité dans la classe diffère significativement de la proportion de la modalité dans la population globale et permet de déceler les modalités spécifiques à chaque classe [7].

Tableau XXXIII

Fréquence (unité) et valeur-test des quatre modalités (Zone, Altitude, Transformation et Catégorie) des regroupements de tous les échantillons dans leur classe respective.

Modalité	classe 1	V test	classe 2	V test	classe 3	V test	Population globale
C	30	2,469	18	0,995	15	-3,277	63
N	12	-2,727	12	-0,663	33	3,239	57
S	24	0,185	15	-0,345	27	0,121	66
population	66		45		75		186
1	48	7,045	9	-2,952	15	-4,295	72
2	12	-3,037	15	0,177	33	2,808	60
3	6	-4,432	21	2,985	27	1,716	54
population	66		45		75		186
A	24	1,629	12	-0,400	18	-1,240	54
C	24	1,629	3	-3,786	27	1,716	54
E	12	-1,061	15	1,976	15	-0,690	42
G	6	-2,621	15	2,719	15	0,183	36
population	66		45		75		186
gd	42	<u>9,290</u>	3	-3,145	0	-6,316	45
su	6	-5,564	12	-1,416	48	<u>6,663</u>	66
au	18	-2,683	30	<u>4,127</u>	27	-0,985	75
population	66		45		75		

D'après le tableau XXXIII, les trois classes ont pu être identifiées grâce à la « la valeur-test » calculée pour les trois catégories commerciales. En effet, la classe 1 est la plus caractéristique des cafés « Grand cru » (**Valeur test : 9,29**), la classe 2 celle des cafés « Authentique » (**Valeur test : 4,127**) et la classe 3 celle des cafés « Sublime » (**Valeur test : 6,663**).

En terme de modalités pédoclimatiques, la zone C, l'altitude 1 et plus faiblement les transformations A et C, caractérisent la classe 1 des cafés « Grand cru ». L'altitude 3 et la transformation G caractérisent la classe 2 des cafés « Authentique », aucune des trois zones n'obtient une valeur absolue de leur « valeur-test » supérieure à 2. La zone N, l'altitude 2 et plus faiblement la transformation C caractérisent les cafés « Sublime ».

D'une part, le type de transformation a un faible impact sur la caractérisation des catégories commerciales sur le plan de la composition biochimique des échantillons de café vert, du fait des valeurs absolues de ces « valeur-test » qui sont globalement inférieures à 2. Ceci corrobore le résultat mis en évidence dans l'étude traitant de l'influence des paramètres pédoclimatiques sur la composition biochimique globale des échantillons dans la mesure où le type de transformation n'a aucune influence sur la composition du café vert.

D'autre part, la présence d'échantillons de cafés appartenant à des catégories différentes de celle dans laquelle ils sont classés. En effet, dans la classe des cafés « Grand

cru », 6 cafés « Sublime » et 18 cafés « Authentique » auraient une composition biochimique en café vert similaire aux cafés « Grand cru ». Dans la classe des cafés « Authentique », on dénombre 3 cafés « Grand cru » et 12 cafés « Sublime » qui auraient donc une composition biochimique similaire aux cafés « Authentique ». De la même manière, dans la classe des cafés « Sublime », il y a 27 cafés « Authentique ».

Enfin, une nouvelle ACP a été réalisée afin de corrélérer ces trois classes avec les composés biochimiques retenus préalablement, dans le but de déterminer des critères de différenciation biochimique entre les trois catégories commerciales. Les 186 échantillons ont été pris pour variables qualitatives, la teneur des composés biochimiques de chaque échantillon comme variable quantitative et, le numéro de la classe respective de chaque échantillon comme donnée supplémentaire.

Les valeurs des cosinus carrés des variables quantitatives sont consignées dans le tableau XXXIV :

Tableau XXXIV
Valeurs des cosinus carrés des composés biochimiques suivant les axes F1 et F2.

Composés	F1	F2
C16:0	0,655	0,232
C18:2 cc	0,709	0,170
glucose	0,297	0,594
3,4-diCQA	0,538	0,072
Σ acides gras /glu.	0,201	0,760
Σ acides chloro./glu.	0,275	0,673

L'axe F1 est corrélé positivement avec les acides gras C16:0 et C18:2 cc et négativement avec le 3,4-diCQA, tandis que l'axe F2 est corrélé positivement avec les rapports Σ acides gras /glu. et Σ acides chloro./glu. et, négativement avec le glucose.

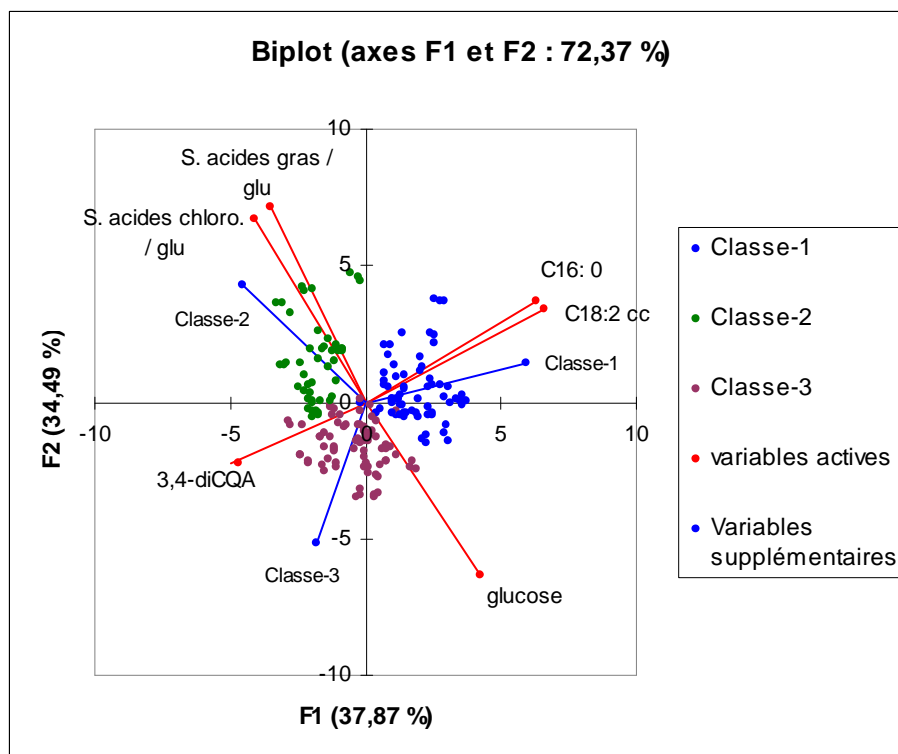


Figure 24 : Analyse en composantes principales des 186 échantillons suivant le numéro de leur classe, en fonction de la teneur des composés biochimiques retenus.

L'ACP présentée dans la figure 24 confirme le regroupement des échantillons suivant leur catégorie commerciale respective et la représentation graphique des échantillons dans le plan 1, 2 montre une discrimination de ces trois catégories. Au niveau de l'axe F1, les catégories « Grand Cru » et « Authentique » sont nettement discriminées. Les cafés issus de la catégorie « Grand Cru » ont des teneurs plus élevées en C16:0 et C18:2 cc tandis que les cafés « Authentique » ont des rapports Σ acides gras /glu. et Σ acides chloro./glu. plus élevés. Ceci confirme d'une part, les résultats de Oliviera *et al.*, (2006) [8] qui a démontré que le pourcentage de matière grasse dans des graines de cafés de qualité supérieure était plus élevé et, d'autre part ceux de Ramalakshmi *et al.*, (2009) [9] et de Mazzafera (1999) [10] qui ont mis en évidence une teneur en acides chlorogéniques plus élevée dans des cafés d'une qualité inférieure. Au niveau de l'axe F2, les cafés de la catégorie « Sublime » ont des teneurs plus élevées en glucose.

3 - Corrélation entre la composition aromatique des cafés boissons et les différentes catégories

3.1. Composé volatil et impact olfactif

Parmi toutes les substances volatiles présentes dans un aliment, certains composés ont un impact olfactif plus important que d'autres et sont odorants à très faible concentration. Ces composés d'impact sont des molécules-clés représentatives de l'odeur du produit. Grosch estime qu'au maximum, 5% des molécules identifiées dans les aliments contribuent notablement à l'arôme [11]. Le degré d'impact olfactif d'une substance est mesuré par diverses méthodes olfactométriques. Ces méthodes peuvent être classées selon trois principes :

- Les techniques utilisant le principe des dilutions successives. Ce sont les méthodes dénommées AEDA (Aroma Extract Dilution Analysis ou CHARM (Combined Hedonic Response Measurement) [12, 13]. Elles s'appuient sur des dilutions successives d'un extrait jusqu' à « la » dilution où plus aucune odeur ne puisse être perçue par un panéliste lors de l'analyse en chromatographie gazeuse couplée à un olfactomètre (CGO).

- Les techniques basées sur le principe temps-intensité. Ce sont les techniques OSME (traduction de Smell en grec) [14] et FSCM (Finger Span Cross Modality Matching). L'extrait est injecté à une seule dilution en CGO et les panélistes enregistrent en continu l'intensité de l'odeur perçue par l'intermédiaire d'un rhéostat.

- Les techniques basées sur la fréquence de détection. Ce sont les techniques OGA (Olfactometry Global Analysis) [15], NIF (Nasal Impact Frequency), SNIF (Surface of Nasal Impact Frequency). L'extrait est injecté en CGO à une seule dilution et la variable suivie est la fréquence de détection des odeurs à chaque instant de l'analyse par le panéliste. La mesure est représentée par le pourcentage de panélistes ayant perçu une odeur (NIF) ou par l'aire de la courbe définie pour le caractère recherché.

Certaines de ces techniques tels que l'AEDA sont couplées à la détermination des OAV (Odor Activity Value) qui traduit la capacité odorante d'une substance volatile. L'OAV est aussi dénommée « Nombre d'Unités d'Odeur » et se définit comme le rapport entre la concentration de la substance dans l'aliment et son seuil de perception dans la même matrice [16]. La substance volatile, dont la capacité odorante est supérieure, à 1 a généralement un impact olfactif d'autant plus important que sa capacité odorante est élevée. De même, les variables Log (OAV) et RFA (Relative Flavor Activity) sont souvent utilisés. Cette dernière

nécessitant le recours préalable à une technique de dilution. Malgré des critiques concernant l'OAV qui soulignent la différence entre le seuil de perception d'une molécule en phase gazeuse dans l'air et son seuil de perception de cette même molécule dans l'aliment, son utilisation donne une première approche des molécules ayant un certain impact.

Parmi les centaines de composés aromatiques identifiés dans l'arôme du café par les méthodes chromatographiques couplées à un spectromètre de masse, les méthodes d'analyses olfactométriques comme l'AEDA ou CHARM ne révèlent l'importance olfactive que de quelques dizaines de composés volatils dans l'arôme du café [17, 18]. Semmelroch and Grosch, (1999) [19] mettent en évidence 22 composés responsables de l'arôme de café parmi les centaines de composés identifiés comme nous l'indique le tableau XXXV.

Tableau XXXV
Liste des 22 composés responsables de l'arôme de café avec leur teneur exprimée en µg/L et leur valeur OAV respective dans les Arabicas et les Robustas [19].

Numéro	Composés	Arabica (µg/L)	Robusta (µg/L)	Arabica OAV	Robusta OAV
1	4-hydroxy-2,5-diméthyl-3(2H)-furanone	4510	2480	450	250
2	2,3-butanedione	2750	2400	183	160
3	4-vinylguaïacol	1640	5380	82	270
4	2,3-pentanedione	1570	750	52	25
5	2-éthyl-4-hydroxy-5-méthyl-3(2H)-furanone	840	670	42	29
6	méthylpropanal	800	1380	1140	1970
7	2-méthylbutanal	650	1300	500	1000
8	3-méthylbutanal	550	925	1570	2640
9	propanal	435	435	44	44
10	vanilline	220	740	9	30
11	méthanethiol	210	600	1050	3000
12	guaïacol	170	1230	68	490
13	3-hydroxy-4,5-diméthyl-2(5H)-furanone	77	31	257	103
14	4-éthylguaïacol	51	635	1	13
15	2-furfurylthiol	19,1	39	1910	3900
16	2-éthyl-3,5-diméthylpyrazine	13,1	35,2	82	220
17	5-éthyl-3-hydroxy-4-méthyl-2(5H)-furanone	8,7	4,4	1	0,1
18	méthional	5,7	2,8	29	14
19	3-mercapto-3-méthylbutylformate	5,5	4,3	1570	1230
20	2,3-diéthyl-5-méthylpyrazine	3,2	9,3	36	103
21	(E)-β-damascénone	1,3	1,5	1730	2000
22	3-isobutyl-2-méthoxypyrazine	1	0,17	200	34

L'examen des tableaux XX et XXXV montre que seuls 8 composés sont en communs. De plus, des différences de concentrations pour certains composés communs sont observées comme le montre le tableau XXXVI.

Tableau XXXVI

Concentration en mg/L des composés communs entre l'identification de la fraction aromatique du café « Bourbon Pointu » et la liste de Semmelroch, Grosch (1996) [19].

Nom du composé	Concentration mesurée (mg/L)	Concentration référence (mg/L)
3-méthylbutanal	0,53	0,55
2-méthylpropanal	0,36	0,80
2-méthylbutanal	0,45	0,65
4-hydroxy-2,5-diméthyl-3-furanone	9,60	4,1
2-méthoxy-4-vinylphénol	1,33	1,64
2-éthyl-3,5-diméthylpyrazine	0,66	0,01
2-méthoxyphénol	1,53	0,17
pentane-2,3-dione	0,01	1,57

En effet, une teneur plus faible en aldéhydes et une teneur plus élevée en hétérocycles, excepté pour le 2-méthoxy-4-vinylphénol, sont à noter dans les échantillons de boisson café par rapport aux concentrations de référence.

Ces deux différences par rapport à la liste des composés de référence les plus odorants soulignent le caractère atypique du café de La Réunion, le « Bourbon Pointu ».

Les causes de cette typicité liées à des molécules remarquables sont également développées au cours de ce travail en se basant sur les analyses sensorielles des cafés classés dans leur catégorie commerciale.

3.2. Caractérisation aromatique des cafés boissons par catégorie commerciale

Les moyennes des concentrations des composés aromatiques en mg/L et leurs « odor activity value », (OAV = concentration / seuil olfactif ; sans unité) pour chacune des trois catégories commerciales pour les deux années confondues ont été calculées à partir respectivement de leur quantification sur colonne polaire et de la valeur des seuils olfactifs (ppm) indiquée dans la littérature. Leurs caractéristiques odorantes issues de la recherche bibliographique [20-27] sont aussi reportées dans le tableau XXXVII.

Tableau XXXVII
Moyennes des concentrations des composés aromatiques (mg/L) par catégorie commerciale et leur seuil olfactif (ppm), OAV et odeur respectifs

Classes	Composés	Concentration (mg/L)			Seuil olfactif (ppm)	OAV			Odeur
		Gd	Su	Au		Gd	Su	Au	
acides	acide acétique	22,50	24,06	23,70	34,7	1	1	1	aigre
	acide isovalérique	0,67	0,72	1,55	0,4	2	2	4	aigre
alcools	heptan-1-ol	0,34	0,35	0,35	0,2	2	2	2	vert, fruité (pomme, banane)
	2-éthylhexan-1-ol	3,56	3,43	3,57	0,1	36	34	36	fruité (agrumes), floral (rose)
	3-méthylbutan-2-ol	0,47	0,34	0,93	0,5	1	1	2	fruité
	3-méthyl-3-butén-1-ol	0,63	0,43	1,25	0,6	1	1	2	fruité (pomme)
	pent-4-én-2-ol	2,70	2,66	2,74					
	5-méthylhexan-2-ol	0,23	0,15	0,40					
	2-phényléthanol	1,32	1,86	2,45	1,1	1	2	2	floral (rose)
aldéhydes	linalol	0,78	1,06	1,31	0,007	111	151	187	floral, fruité (agrumes)
	(E,Z)-hepta-2,4-diéanal	1,20	1,00	0,68	0,005	240	200	136	floral
	hex-2-én-1-al	0,96	0,92	0,93	0,08	12	12	12	fruité (pomme), herbeux
	(E,E)-nona-2,4-diéanal	1,36	1,12	1,09	0,0001	13600	11200	10900	fruité (agrumes), gras
	2-méthylbut-2-éanal	1,16	1,11	0,99	0,2	6	6	5	fruité, vert
	2-méthylbenzaldéhyde	0,64	0,39	0,21					
	2-méthylbutanal	0,84	0,58	0,20	0,003	280	193	67	chocolat
	2-phénylacétaldéhyde	0,80	1,08	0,23	0,004	200	270	58	fruité, floral
	acétaldéhyde	1,05	0,75	3,46	0,08	13	9	43	fruité, vert
	benzaldéhyde	0,80	0,73	3,11	0,8	1	1	4	amer, amande
	décanal	0,83	1,05	1,36	0,02	42	53	68	citron, gras
	dodécanal	0,96	1,04	1,11	0,03	32	35	37	mielleux, agrume
	hexanal	0,47	0,82	1,80	0,007	67	117	257	vert, herbeux
	2-méthylpropanal	0,32	0,43	0,35	0,003	107	143	116	chocolat, malté
	3-méthylbutanal	1,02	0,70	0,21	0,001	1020	700	210	chocolat, malté
benzéniques	1,3,5-triméthylbenzène	0,63	0,71	0,34	0,5	1	1	1	
	1-éthyl-3-méthylbenzène	0,19	0,12	0,08	0,0006	317	200	133	floral
	p-xylène	0,51	1,23	3,00	0,5	1	3	6	herbeux
cétones	3-méthylcyclohexan-1-one	0,18	0,18	0,19	7,5	<1	<1	<1	amer

Tableau XXXVII (suite)

	octa-1,6-diène	1,22	1,04	1,36					
	2,3-diméthylcyclopent-2-én-1-one	0,41	0,61	0,38					boisé, herbeux
	hexane-2,5-dione	0,83	1,06	0,80					
	2,6-diméthylcyclohexanone	1,26	1,15	0,83	0,1	13	12	8	
	butan-2-one	1,22	0,88	1,35	50	<1	<1	<1	fruité
	cyclopent-2-én-1-one	0,41	0,57	0,75					
	heptan-2-one	0,13	0,19	0,46	0,6	<1	<1	1	herbeux, amer
	2-méthylcyclopent-2-én-1-one	0,91	1,20	0,91					
	hexan-3-one	5,72	5,73	5,92	15,0	<1	<1	<1	fruité
	hexane-3,4-dione	0,97	1,03	0,93					toasté
	3-hydroxybutan-2-one	1,42	2,00	1,30	3,2	<1	1	<1	beurrée
	cyclopentanone	17,47	17,04	15,22					Menthe
	2-hydroxy-3-méthylcyclopent-2-én-1-one	2,03	2,31	2,04	0,2	10	12	10	érable, céréales
esters	acétate de méthyle	1,05	0,97	0,44	2,3	<1	<1	<1	fruité (pêche)
furanes	2-(méthoxyméthyl)-furan	1,87	2,41	2,68					
	2-(furan-2-ylméthoxyméthyl)-furan	0,17	0,11	0,14					
	2,3-dihydrobenzofurane	0,21	0,28	0,29					
	1-(5-méthylfuran-2-yl)-éthanone	2,51	3,42	3,77	10	<1	<1	<1	noisette
	1-(2-furanyl)-éthanone	9,75	10,47	11,39	10	1	1	1	amandes, noisettes
	2-furfurylthiol	3,25	3,14	3,26	0,00003	108333	104666	108666	café torréfié
	5-hydroxy-2-méthylfurfural	6,66	9,33	10,30	100	<1	<1	<1	caramel
	5-méthyl-2(5H)-furanone	2,44	2,40	2,54					
	(5-méthylfuran-2-yl)-méthanol	0,26	0,20	0,23					
	5-méthyl-2-furfural	34,83	35,38	39,83	2,4	15	15	17	caramel, amandes grillées
	2-furaneméthanol	247,36	249,77	280,75	2	124	125	140	caramel
	2-méthyloxolan-3-one	3,52	3,74	4,13					caramel
	4-hydroxy-2,5-diméthyl-3(2H)-furanone	7,57	10,01	10,95	0,05	191	200	219	caramel, fruité (fraise)
	furan-2-carbaldéhyde	80,33	84,23	93,09	5,3	15	16	17	caramel, amandes grillées
	(E)-4-furan-2-ylbut-3-én-2-one	0,30	0,47	0,50	0,02	15	24	25	boisé
	formate de furan-2-ylméthyle	1,82	1,88	2,13					éthérée
	γ-butyrolactone	80,05	88,60	130,44	1	80	89	130	crème
oxazoles	1,3-benzoxazole	1,34	1,45	1,67					
phénoliques	2-méthoxy-4-prop-2-énylphénol	0,14	0,16	0,22	0,06	2	3	4	épicé
	2-méthoxy-4-vinylphénol	1,17	0,66	1,19	0,02	59	33	60	épicé

Tableau XXXVII (suite)

pyrazines	2-méthoxyphénol	1,23	1,59	1,66	0,007	175	227	237	<i>épicé</i>
	phénol	0,93	1,06	1,48	2,4	<1	<1	1	<i>épicé</i>
	1-(6-méthyl-2-pyrazinyl)-1-éthanone	2,04	2,40	3,84	1,7	1	1	2	<i>popcorn</i>
	2,3,5-triméthylpyrazine	4,34	5,72	8,45	0,6	7	10	15	<i>terreux</i>
	2,3-diméthyl-5-éthylpyrazine	0,16	0,23	0,40	0,001	160	230	400	<i>cacao</i>
	2,3-diméthylpyrazine	6,64	6,73	8,89	7,7	1	1	1	<i>noisettes grillées</i>
	2,5-diméthylpyrazine	9,83	9,34	14,07	1,6	6	6	9	<i>grillé</i>
	2,6-diméthylpyrazine	9,79	9,21	13,90	3,1	3	3	5	<i>grillé</i>
	2,6-diéthylpyrazine	0,22	0,41	0,81	0,006	37	68	135	<i>grillé</i>
	2-acétyl-3-méthylpyrazine	1,87	1,91	2,71	0,02	94	96	135	<i>noisette</i>
	2-éthyl-3,5-diméthylpyrazine	0,63	0,67	0,84	0,001	630	670	840	<i>noisettes grillées</i>
	2-éthyl-5-méthylpyrazine	4,98	3,91	7,56	0,1	50	39	76	<i>cumin</i>
	2-éthyl-6-méthylpyrazine	2,32	2,66	4,10					<i>cumin</i>
	2-éthylpyrazine	1,26	0,95	2,21	10	<1	<1	<1	<i>noisette</i>
	2-méthyl-5-propylpyrazine	0,34	0,65	0,67	0,00004	8500	16250	16750	<i>grillé</i>
	2-méthylpyrazine	36,39	32,27	47,03	42,5	1	1	1	<i>noisette</i>
	2-vinylpyrazine	0,76	0,80	1,25	0,7	1	1	2	<i>noisette</i>
pyridines	3-éthyl-2,5-diméthylpyrazine	0,78	0,54	1,44	0,001	780	540	1440	<i>grillé</i>
	acétylpyrazine	0,03	0,02	0,05	0,06	1	<1	1	<i>grillé</i>
	pyrazine	3,05	3,61	5,69	177,5	<1	<1	<1	<i>noisette</i>
	2-acétylpyridine	0,10	0,07	0,11	0,02	5	4	6	<i>pop-corn</i>
	pyridine	0,68	0,95	1,45	2	<1	<1	1	<i>caramel</i>
pyrroles	2-pyridineméthanol	11,73	14,15	20,56					
	1-(1H-pyrrol-2-yl)-éthanone	5,69	7,32	7,10	170	<1	<1	<1	<i>grillé</i>
	1-méthylpyrrole	0,85	1,85	1,16	0,04	21	46	29	<i>boisé, herbeux</i>
	1-(1-méthylpyrrol-2-yl)-éthanone	0,49	0,61	0,62	2	<1	<1	<1	<i>noisette, fruité</i>
	1-méthylpyrrole-2-carbaldéhyde	3,46	4,10	4,09	0,7	5	6	6	
	1H-pyrrole-2-carbaldéhyde	8,16	10,94	10,93	1	8	11	11	<i>vert (champignons)</i>
	2-méthylpyrrole	4,14	4,27	3,59	0,02	207	213	179	
	5-méthyl-1H-pyrrole-2-carboxaldéhyde	0,07	0,05	0,08					
terpènes et autres	furfurylpyrrole	0,44	0,52	0,54					<i>cacao, grillé</i>
	pyrrole	0,77	0,85	0,94	34,8	<1	<1	<1	<i>noisettes grillées</i>
	β-pinène	2,11	2,22	2,09	0,07	30	32	30	<i>boisé, fruité (agrumes)</i>
	β-cis-ocimène	1,26	2,17	0,99	0,06	21	36	17	<i>fruité (agrumes)</i>

Tableau XXXVII (suite et fin)

	limonène	1,32	1,25	1,08	0,2	7	7	6	fruité (agrumes)
	maltol	7,76	7,52	9,52	5,8	1	1	2	caramel
	β -trans-ocimène	1,73	0,64	0,43	0,06	29	11	7	fruité (agrumes)
	quinoxaline	0,56	0,66	0,35					
thiazoles	2-acétylthiazole	0,48	0,92	0,21	0,01	48	92	21	grillé, pop-corn
	4,5-diméthylthiazole	0,59	0,65	0,28	0,5	1	1	1	
	benzothiazole	1,06	1,06	0,48	0,07	15	15	7	grillé
	thiazole	0,30	0,42	0,15					noisette
thiophènes	2-éthylthiophène	0,13	0,10	0,14					
	2-thiophèneméthanol	1,03	1,27	1,70					
	dihydro-2-méthyl-3(2H)-thiophénone	0,23	0,27	0,25					vert (mûre), soufré

D'après le tableau XXXVII, le profil aromatique du café « Bourbon Pointu » est caractérisé par 107 composés tous répertoriés dans l'arôme de café, dont 18 pyrazines, 17 furanes et 14 cétones pour les classes les plus abondantes. Les classes les moins fournies sont les oxazoles, les esters et les acides avec 1 composé chacune, les pyridines, les benzènes et les thiophènes avec 3 composés chacune. En terme de concentration, les composés les plus importants sont le 2-furanéméthanol, le furfural, le 2-méthylpyrazine et la γ -butyrolactone. Si les trois premiers composés sont très souvent cités dans la littérature pour le café torréfié, la γ -butyrolactone quant à elle est identifiée dans de nombreux vins [28, 29].

La classe des cétones est représentée par un nombre non négligeable de composés cycliques carbonylés et leur présence est liée à la formation des mélanoidines, composés responsables de la couleur brune du café [30].

La notion du seuil olfactif joue un rôle essentiel dans l'identification des composés odorants majeurs. Ainsi, à l'image du 2-méthyl-5-propylpyrazine dont la concentration moyenne (de l'ordre de 0,50 mg/L) similaire à celle du 2-acétylthiazole, a un seuil olfactif (0,00004 ppm) 250 fois plus faible que celui du composé thiazole (0,01 ppm). L'impact olfactif du 2-méthyl-5-propylpyrazine est donc plus élevé. Afin de déterminer les molécules ayant olfactivement le plus d'impact, la valeur de leurs OAV a été calculée à partir différents seuils olfactifs disponibles dans la littérature. En fonction des OAV calculées, les composés aromatiques les plus odorants du café boisson « Bourbon Pointu » sont présentés dans le tableau XXXVIII.

Tableau XXXVIII

Liste des composés aromatiques les plus odorants dans la boisson café « Bourbon Pointu », avec leur teneur exprimée en mg/L, seuil olfactif (ppm), OAV et odeur et respectifs.

Composés	Concentration (mg/L)			Seuil olfactif (ppm)	OAV			odeur
	Gd	Su	Au		Gd	Su	Au	
2-furfurylthiol	3,25	3,14	3,26	0,00003	108333	104666	108666	café torréfié
(<i>E,E</i>)-nona-2,4-diéнал	1,36	1,12	1,09	0,0001	13600	11200	10900	fruité (agrumes), gras
2-méthyl-5-propylpyrazine	0,34	0,65	0,67	0,00004	8259	16250	16372	grillé
3-éthyl-2,5-diméthylpyrazine	0,78	0,54	1,44	0,001	780	540	1440	grillé
3-méthylbutanal	1,02	0,70	0,21	0,001	1020	700	210	chocolat, malté
2-éthyl-3,5-diméthylpyrazine	0,63	0,67	0,84	0,001	630	670	840	noisettes grillées
1-éthyl-3-méthylbenzène	0,19	0,12	0,08	0,0006	317	200	133	floral
2-méthylbutanal	0,84	0,58	0,20	0,003	280	193	67	chocolat
2,3-diméthyl-5-éthylpyrazine	0,16	0,23	0,40	0,001	160	230	400	cacao
2-phénylacétaldéhyde	0,80	1,08	0,23	0,004	200	270	58	floral (rose), mielleux
hexanal	0,67	0,82	1,80	0,007	96	117	257	vert, herbeux
(<i>E,Z</i>)-hepta-2,4-diéнал	1,20	1,0	0,68	0,005	240	200	136	floral
2-méthoxyphénol	1,23	1,59	1,66	0,007	175	227	237	épicé
2-méthylpyrrole	4,14	4,27	3,59	0,02	207	213	179	
4-hydroxy-2,5-diméthyl-3 (2 <i>H</i>)-furanone	7,57	10,01	10,95	0,05	191	200	219	caramel, fruité (fraise)
linalol	0,78	1,06	1,31	0,007	111	151	187	floral, fruité (agrumes)
2-méthylpropanal	0,32	0,43	0,35	0,003	107	143	116	chocolat, malté
2-furanéméthanol	247,36	249,77	280,75	2	124	125	140	caramel
2-acétyl-3-méthylpyrazine	1,87	1,91	2,71	0,02	94	96	135	noisette
2,6-diéthylpyrazine	0,22	0,41	0,81	0,006	37	68	135	grillé
γ-butyrolactone	80,05	88,60	130,44	1	80	89	130	crème
2-méthoxy-4-vinylphénol	1,17	0,66	1,29	0,02	59	33	65	épicé, floral

Seuls 22 composés ont été retenus parmi lesquels, on retrouve 7 aldéhydes, 6 pyrazines, 4 furanes, 2 composés phénoliques et 1 composé pour les classes des alcools, benzènes et pyrroles. Certains composés de cette liste sont aussi considérés par Selmmersch et Grosch, (1996) [19] comme les composés les plus odorants du café boisson lors d'une étude similaire. Le 2-furfurylthiol est le composé le plus odorant avec une odeur caractéristique de café torréfié. Les (2-) et 3-méthylbutanal sont responsables de l'odeur de chocolat. La 2-éthyl-3,5-diméthylpyrazine apporte une odeur de noisettes grillées et le 2-méthoxyphénol et le 2-méthoxy-4-vinylphénol soutiennent une légère odeur épicée. Cependant, la particularité du profil aromatique odorant du « Bourbon Pointu » est liée aux molécules telles que le (*E,E*)-nona-2,4-diéнал, le (*E,Z*)-hepta-2,4-diéнал, le 2-phénylacétaldéhyde, le 4-hydroxy-2,5-diméthyl-3 (2*H*)-furanone, le linalol et l'hexanal. En effet, par leurs types d'odeur florale (rose), fruité (agrumes, fraise), légumes verts, caramel

mis en valeur par une OAV importante et par le fait qu'elles ne soient que très rarement citées et quantifiées dans la littérature sur le café boisson, ces molécules sont à l'origine de la typicité de l'arôme de café « Bourbon Pointu ».

Par exemple, le linalol et le (*E,E*)-nona-2,4-diényl font partie des principaux composés odorants de l'orange [31], le 4-hydroxy-2,5-diméthyl-3(2*H*)-furanone est un des composés majoritaires de la fraise et de l'ananas [32, 33, 34] et le 2-phénylacétaldéhyde contribue à l'arôme de la rose [35].

Dans la suite de cette étude, les composés aromatiques communs aux trois catégories commerciales et ceux qui sont propres à chacune sont identifiés afin de pouvoir dresser un critère de différenciation olfactif entre les cafés « Grand cru », « Sublime » et « Authentique ».

3.2.1. Composés communs aux trois catégories commerciales

Une ANOVA (seuil de risque 5%) a été effectuée sur les concentrations des composés aromatiques des catégories commerciales et dans un premier temps, les composés dont la concentration n'était pas significativement différente entre les trois catégories ont été retenus. Le tableau XXXIX regroupe ces composés qui font donc partie du « pool » odorant commun aux trois catégories commerciales.

Tableau XXXIX

Liste des composés aromatiques communs aux cafés boisson « Bourbon Pointu » des trois catégories commerciales, avec leur teneur exprimée en mg/L, et leur seuil olfactif, OAV, et odeur respectifs

Composés	Concentration (mg/L)			Seuil olfactif (ppm)	OAV			odeur
	Gd	Su	Au		Gd	Su	Au	
2-furfurylthiol	3,25	3,14	3,26	0,00003	108333	104666	108666	café torréfié
2-méthylpropanal	0,32	0,43	0,35	0,003	107	143	116	chocolat, malté
dodécanal	0,96	1,04	1,11	0,03	32	35	37	mielleux, agrume
2-éthylhexan-1-ol	3,56	3,43	3,57	0,1	36	34	36	agrume, rose
β-pinène	2,11	2,22	2,09	0,07	30	32	30	boisé (pin), agrume
furane-2-carbaldéhyde	80,33	84,23	93,09	5,3	15	16	17	boisé, caramel, noisette
2-hydroxy-3-méthylcyclopent-2-én-1-one	2,03	2,31	2,04	0,2	10	12	10	érable, sirop
hex-2-én-1-al	0,96	0,92	0,93	0,08	13	12	12	vert (pomme)
2-méthylbut-2-énal	1,16	1,11	0,99	0,2	6	6	5	vert, fruité
1-méthylpyrrole-2-carbaldéhyde	3,46	4,10	4,09	0,7	5	6	6	
1-(2-furanyl)-éthanone	9,75	10,47	11,39	10	1	1	1	caramel, cacao
heptan-1-ol	0,34	0,35	0,35	0,2	2	2	2	vert (pomme, banane)
acide acétique	22,50	24,06	23,70	34,7	1	1	1	aigre
hexan-3-one	5,72	5,73	5,92	15,0	<1	<1	<1	fruité
3-méthylcyclohexan-1-one	0,18	0,18	0,19	7,5	<1	<1	<1	amère
pent-4-én-2-ol	2,70	2,66	2,74					fruité
hexane-3,4-dione	0,97	1,03	0,93					toast
5-méthyl-2(5H)-furanone	2,44	2,40	2,54					
(5-méthylfuran-2-yl)-méthanol	0,26	0,20	0,23					
1,3-benzoxazole	1,34	1,45	1,67					pyridine
2-éthylthiophène	0,13	0,10	0,14					
dihydro-2-méthyl-3(2H)-thiophénone	0,23	0,27	0,25					vert, soufré

Le « pool » olfactif communs aux trois catégories commerciales se compose d'un groupe de composés exhalant une odeur de café, chocolat et de caramel comme le 2-furfurylthiol, le 2-méthylpropanal, le 1-(2-furanyl)-éthanone ou le furan-2-carbaldéhyde et d'un autre groupe de composés avec des notes florales, fruitées tels que le hex-2-énal et le 2-méthylbut-2-énal [36], le β-pinène [37], le 2-éthylhexan-1-ol et l'heptanol qui sont respectivement des composés majeurs dans l'arôme du melon et de la pomme [38, 39] et le dodécanal qui est un des principaux composés odorants de l'orange [40].

Le tableau XL et la figure 25 mettent en relief le profil sensoriel commun aux trois catégories commerciales à partir des sommes des valeurs OAV et le logarithme de la somme des valeurs OAV pour chaque type d'odeur.

Tableau XL
Profil sensoriel commun aux cafés boisson des trois catégories commerciales « Bourbon Pointu »
représenté par la somme des valeurs OAV et le logarithme de la somme des valeurs OAV
pour chaque type d'odeur.

Type d'odeur	Σ OAV	$\log \Sigma$ OAV
café	102715	5,0
chocolat	104	2,0
citron	73	1,9
orange	36	1,6
caramel	31	1,5
pomme	13	1,1
autres fruits	6	0,8

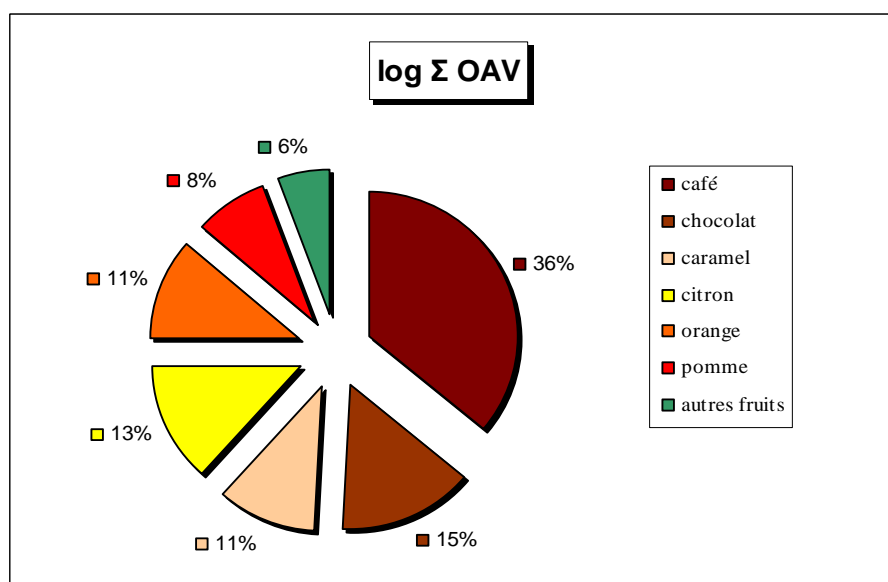


Figure 25 : Proportion en % de chaque type d'odeur dans le profil sensoriel du café boisson « Bourbon Pointu ».

3.2.2. Composés odorants propres à chaque catégorie commerciale

Le tableau XLI regroupe les composés qui n'appartiennent pas au « pool » commun olfactif par conséquent ceux dont la concentration est significativement différente soit entre une catégorie commerciale et les deux autres, soit significativement différente entre les trois catégories. Les composés repérés par le chiffre 1 en exposant sont ceux qui sont à l'origine de la différenciation aromatique entre les cafés « Grand cru », « Sublime » et « Authentique ».

Tableau XLI
Liste des composés aromatiques non communs entre les cafés boisson des trois catégories commerciales avec leur valeur OAV et odeur respectives.

Composés	OAV			Odeur
	Gd	Su	Au	
(<i>E,E</i>)-nona-2,4-diéna ¹	13600	11200	10900	<i>fruité (agrumes), gras</i>
1-éthyl-3-méthylbenzène ¹	317	200	133	<i>floral</i>
(<i>E,Z</i>)-hepta-2,4-diéna ¹	240	200	136	<i>floral</i>
2-phénylacétaldéhyde ¹	200	270	58	<i>fruité, floral</i>
linalol ¹	111	151	187	<i>floral, fruité (agrumes)</i>
décanal ¹	42	53	68	<i>citron, gras</i>
β - <i>cis</i> -ocimène ¹	21	36	17	<i>fruité (agrumes)</i>
β - <i>trans</i> -ocimène ¹	29	11	7	<i>fruité (agrumes)</i>
acétaldéhyde ¹	13	9	43	<i>fruité, vert</i>
2-méthyl-5-propylpyrazine	8500	16250	16750	<i>grillée</i>
3-éthyl-2,5-diméthylpyrazine ¹	780	540	1440	<i>grillée</i>
2-acétyl-3-méthylpyrazine	94	96	135	<i>noisette</i>
2,6-diéthylpyrazine ¹	37	68	135	<i>grillée</i>
2-acétylthiazole ¹	48	92	21	<i>grillée, popcorn</i>
3-méthylbutanal ¹	1020	700	210	<i>chocolat, malté</i>
2-méthylbutanal ¹	280	193	67	<i>chocolat</i>
2,3-diméthyl-5-éthylpyrazine ¹	160	230	400	<i>cacao</i>
2-méthoxyphénol	175	227	237	<i>épicé</i>
2-méthoxy-4-vinylphénol	59	33	60	<i>épicé</i>
4-hydroxy-2,5-diméthyl-3 (2 <i>H</i>)-furanone	191	200	219	<i>caramel, fruité (fraise)</i>
2-furaneméthanol	124	125	140	<i>caramel</i>
5-méthyl-2-furfural	15	15	17	<i>caramel, amandes grillées</i>
2-éthyl-3,5-diméthylpyrazine	630	670	840	<i>noisettes grillées</i>
hexanal ¹	67	117	257	<i>vert, herbeux</i>
2-éthyl-5-méthylpyrazine ¹	50	39	76	<i>cumin</i>
1-méthylpyrrole ¹	21	46	29	<i>boisé, herbeux</i>
(<i>E</i>)-4-furan-2-ylbut-3-én-2-one	15	24	25	<i>boisé</i>
1 <i>H</i> -pyrrole-2-carbaldéhyde	8	11	11	<i>vert (champignons)</i>
2,3,5-triméthylpyrazine ¹	7	10	15	<i>terreux</i>
<i>p</i> -xylène ¹	1	3	6	<i>herbeux (persil)</i>

¹ Composés dont la concentration est significativement différente, au seuil de risque 5 % selon le test de Student, entre les cafés des trois catégories commerciales.

La majorité des composés dont la concentration est significativement différente entre les trois catégories se situe dans le groupe de composés de type d'odeur florale, fruitée (8 composés sur 8), dans le groupe de type d'odeur grillée (3 composés sur 5), le groupe de type d'odeur verte, boisée (5 composés sur 7) et dans le groupe de composés ayant une odeur de chocolat (3 composés sur 3). Il faut noter que dans les groupes de type d'odeur épicée, caramel, aucun composé ne discrimine les trois catégories commerciales. Les composés propres à chaque catégorie, ils ont été répertoriés dans le tableau XLII.

Tableau XLII
Liste des composés aromatiques spécifiques aux cafés boissons de chaque catégorie commerciale avec leur valeur OAV et odeur respectives.

Composés	OAV			odeur
	Gr	Su	Au	
(<i>E,E</i>)-nona-2,4-diéнал	10861			fruité (agrumes), gras
3-méthylbutanal	696			chocolat, malté
1-éthyl-3-méthylbenzène	314			floral
2-méthylbutanal	279			chocolat
(<i>E,Z</i>)-hepta-2,4-diéнал	211			floral
β - <i>trans</i> -ocimène	13			fruité (agrumes)
2-phénylacétaldéhyde		269		fruité, floral
2-acétylthiazole		52		grillée, popcorn
1-méthylpyrrole		42		boisé, herbeux
β - <i>cis</i> -ocimène		38		fruité (agrumes)
3-éthyl-2,5-diméthylpyrazine			1443	grillée
2,3-diméthyl-5-éthylpyrazine			396	cacao
hexanal			250	vert, herbeux
linalol			169	floral, fruité (agrumes)
2,6-diéthylpyrazine			102	grillée
2-éthyl-5-méthylpyrazine			76	cumin
décanal			73	citron, gras
acétaldéhyde			41	fruité, vert
<i>p</i> -xylène			39	herbeux (persil)
2,3,5-triméthylpyrazine			15	terreux

Les cafés classés « Grand cru » ont comme composés odorants propres une majorité d'aldéhydes accompagnée d'un composé terpénique, le β -*trans*-ocimène et un composé benzénique, le 1-éthyl-3-méthylbenzène qui leur confèrent une note générale fruitée et florale mais aussi une saveur chocolat apportée par les deux composés aldéhydiques, le 2-méthylbutanal et le 3-méthylbutanal.

Les cafés classés « Sublime » possèdent comme composés odorants propres 4 composés issus de 4 familles chimiques différentes, le 2-phénylacétaldéhyde et le β -*cis*-

ocimène qui leur procurent une odeur fruitée, le 2-acétylthiazole qui génère une odeur de grillée et le 1-méthylpyrrole qui leur gratifie d'une légère odeur boisée. Les composés propres des cafés classés « Authentique » appartiennent pour la moitié à la classe des pyrazines, les deux principaux en terme d'OAV, le 3-éthyl-2,5-diméthylpyrazine et le 2,3-diméthyl-5-éthylpyrazine génèrent des odeurs agréables de grillé et de cacao et les deux pyrazines à faible OAV, le 2-éthyl-5-méthylpyrazine et le 2,3,5-triméthylpyrazine leur procurent une odeur de cumin et de terre. Cependant les composés tels le linalol, l'acétaldéhyde et le décanal viennent contrebalancer ces odeurs de type vert par des odeurs agréables de fruits ou de fleurs [31].

4 - Corrélation entre la composition du café vert, la composition aromatique des cafés boissons et les différentes catégories

Le but de cette dernière partie est d'explicitier les relations potentielles entre la composition du grain vert, la génération des arômes et les catégories commerciales.

4.1. Les différents mécanismes de génération d'arômes

La génération d'arômes par voie thermique *via* leurs précurseurs a été largement étudiée. Le rôle de ces précurseurs sujets à ce type de dégradation dans le cas du café est rappelé brièvement pour :

- ✓ Les sucres réducteurs et acides aminés

La réaction Maillard met en jeu des acides aminés et des sucres réducteurs mais le terme de « réaction de Maillard » désigne en fait un ensemble de réactions complexes. Cette réaction se décompose en trois étapes (figure 26).

- La première étape est la condensation entre un sucre réducteur et un acide aminé conduisant à la formation de glycosamines. Ces derniers se modifient ensuite selon les réarrangements d'Amadori et Heyns.
- La deuxième étape est la dégradation des produits d'Amadori et Heyns qui conduit à la formation de composés hétérocycles tels le furfural ou l'hydroxyméthylfurfural.
- La dernière étape correspond à un ensemble de réactions, comme celle de Strecker, (polymérisation, déshydratation, cyclisation, fragmentation) subit

par les intermédiaires réactionnels produits lors de la deuxième étape. Cette dernière étape génère des composés d'arômes tels les pyrazines, pyridines, thiazoles, thiophènes, pyrroles mais aussi des mélanoïdines qui sont des composés bruns non volatils à haut poids moléculaires [41, 42, 43].

✓ Les sucres

La caramélisation est une succession de réactions chimiques générant des composés aromatiques volatils et non volatils à partir des sucres réducteurs (glucose, fructose) et du saccharose. La caramélisation se produit lorsque la température est supérieure à 110°C, température de caramélisation du fructose (160°C pour le glucose et le saccharose). Les différentes réactions chimiques sont une énolisation, une déshydratation, une fragmentation et une polymérisation.

Les premières phases de la caramélisation conduisent à la formation de composés volatils intermédiaires tel que des acides (acide acétique), des cétones (2,3-butanedione). Par la suite, ces composés intermédiaires subissent des réactions de fragmentation et de cyclisation entraînant la formation de composés aromatiques comme le 2(-2-hydroxyacétyl)-furane et le maltol. Les dernières phases de la caramélisation qui sont des réactions de condensation et de polymérisation génèrent des composés bruns ayant un poids moléculaire élevé [44, 45].

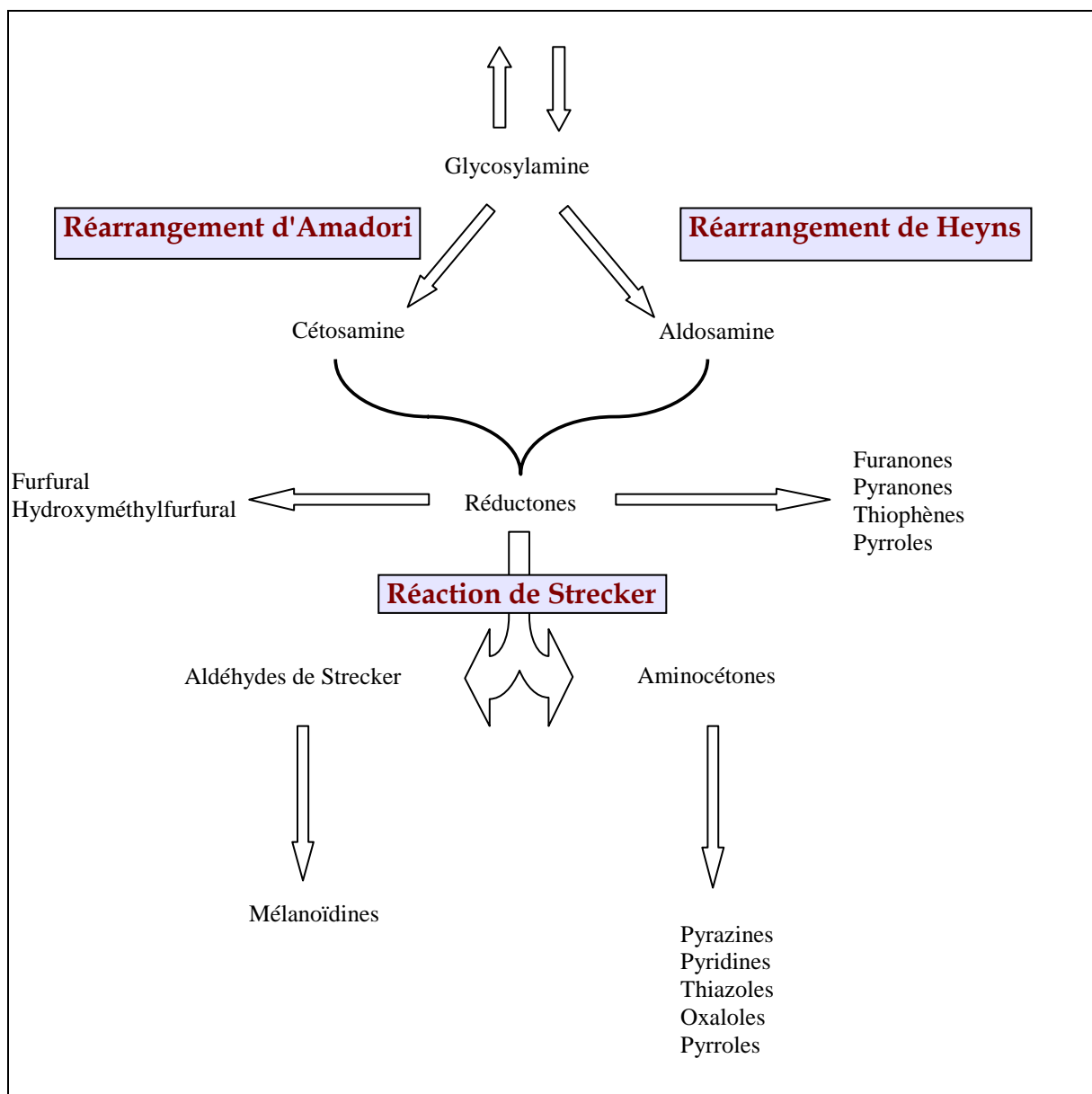


Figure 26 : Schéma simplifié de la réaction de Maillard

✓ Les lipides

La fraction lipidique des grains de café vert est composée à 75% de triglycérides (des acides gras estérifiés). Ces derniers sont sensibles aux réactions d'oxydation se produisant à l'intérieur du grain sous l'action d'enzyme ou sous l'action de facteurs environnementaux. L'hydrolyse et l'oxydation sont les principales voies d'altération des triglycérides affectant la qualité organoleptique du café.

L'hydrolyse enzymatique des triglycérides est le fait d'enzymes lipolytiques tels que la lipase ou la phospholipase. Cette hydrolyse conduit à la formation d'acides gras libres qui serviront de substrats aux réactions d'oxydation.

L'oxydation enzymatique initiée par la lipoxygénase est une réaction stéréospécifique qui aboutit à la formation d'hydroperoxydes. Elle agit spécifiquement sur les acides gras insaturés et avant la torréfaction car la lipoxygénase est inhibée lorsque la température est supérieure à 60°C.

L'oxydation des lipides est une réaction auto-catalytique couplée à une dégradation thermique. C'est un enchaînement de réactions radicalaires aboutissant à la formation d'hydroperoxydes. Elle agit sur les acides gras non estérifiés mais aussi sur les acides gras libres. Les hydroperoxydes obtenus vont subir d'une part, des réactions de dégradation thermique pour produire des composés d'arômes tels les furanes, acides et cétones et d'autre part, des réactions de scissions pour former des radicaux libres très réactifs. Ces derniers vont être sujets à des remaniements inter et intra moléculaires afin de générer des composés d'arômes comme les esters, aldéhydes ou alcools comme l'indique la figure 27 [46, 47].

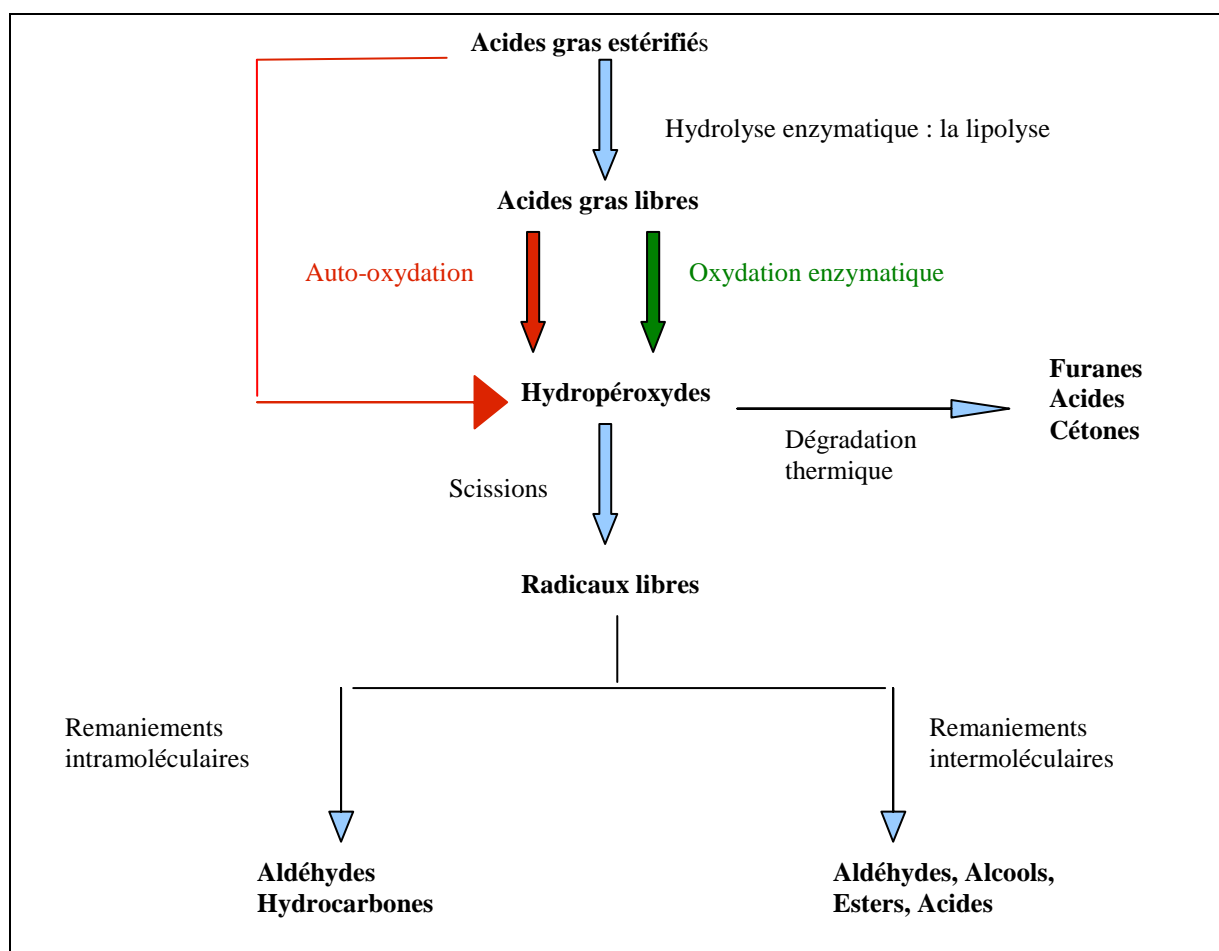


Figure 27 : schéma simplifié de la dégradation des lipides

✓ La trigonelline

La trigonelline est un alcaloïde azoté portant le nom scientifique d'acide *N*-méthylnicotinique. Dans les grains de café vert, sa teneur est comprise entre 0,3 et 1,3% pour 100 grammes de matière sèche. La dégradation de la trigonelline lors de la torréfaction est une pyrolyse aux températures de 180 à 250°C. La dégradation thermique de la trigonelline conduit à la formation de l'acide nicotinique et de composés pyridiniques. Deux voies de formation de ces composés sont proposées selon la figure 28. La première est une décarboxylation suivie d'isomérisations (A) conduisant à la formation des composés pyridiniques. La seconde est une *N*-déméthylation (B) aboutissant à la formation de l'acide nicotinique [48, 49].

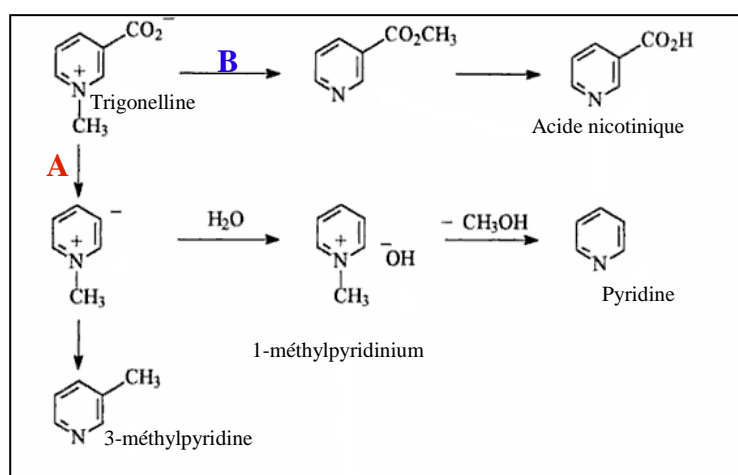


Figure 28 : Schéma simplifié de la formation de composés aromatiques issus de la trigonelline.

Les principaux produits de la dégradation thermique de la trigonelline sont listés dans le tableau XLIII :

Tableau XLIII
Part en pourcentage des principaux composés aromatiques issus de la trigonelline.

Composé	Part de production en pourcentage
acide nicotinique	6,00%
pyridine	5,50%
3-méthylpyrine	3,00%
4-phénylpyridine	3,00%
4-éthylpyridine	> 0,1 %
diméthyl/éthylpropylpyridine	> 0,1 %

✓ Les acides chlorogéniques

Les acides chlorogéniques représentent la part la plus importante de la fraction phénolique du café vert. Les acides chlorogéniques sont des esters formés à partir de dérivés de l'acide cinnamique, en particulier, l'acide caféique et l'acide quinique. Les principaux groupes de composés des acides chlorogéniques sont les acides cafféoylquiniques (CQA), les acides dicafféoylquiniques (diCQA) et les acides féruloylquiniques (FQA). Durant la torréfaction, les acides chlorogéniques subissent des réactions d'isomérisation, d'hydrolyse et de dégradation thermique pour former des composés volatils et non volatils, essentiellement des composés phénoliques [50, 51].

Au début de la torréfaction, l'isomérisation entraîne la diminution des acides chlorogéniques ayant l'acide quinique en position 5 et par conséquent une augmentation de ceux en position 3 et 4.

Les acides chlorogéniques sont partiellement hydrolysés en acide quinique et en acide caféique. Ces derniers sont hydrolysés et après des réactions de décarboxylation et de dégradation, il se forme des composés phénoliques volatils tels le 2-méthoxyphénol ou le 4-éthyl-2-méthoxyphénol mais aussi des furanes comme le montre la figure 29 [52, 53]. De plus, une partie des acides chlorogéniques et en particulier le 3-cafféoylquinique et le 4-cafféoylquinique est déshydratée pour former des quinolactones, une autre partie est dégradée thermiquement et contribue à la formation des mélanoïdines [54, 55].

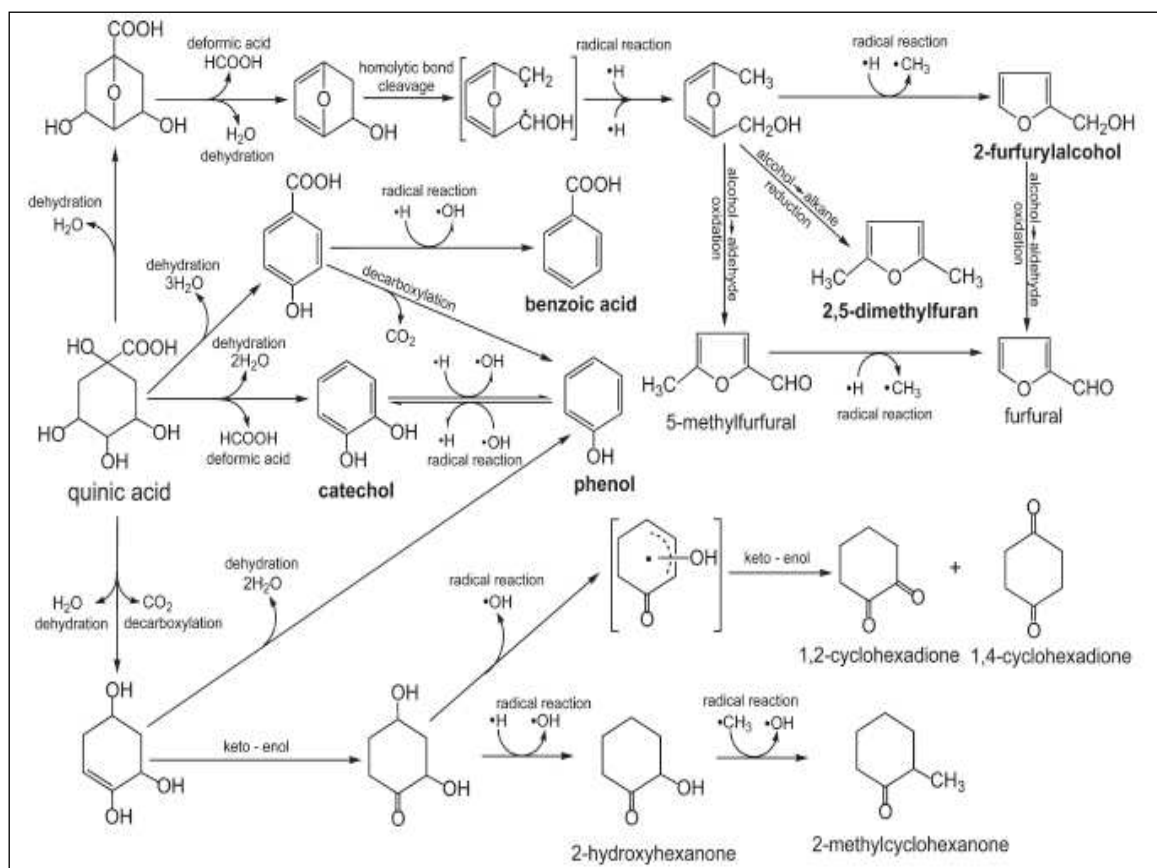


Figure 29 : Schéma simplifié de la dégradation de l'acide chlorogénique.

4.2. Critères de différenciation entre les trois catégories commerciales

Le tableau XLIV récapitule les résultats des deux premières études en précisant pour chaque échantillon appartenant à l'ensemble des 186 échantillons, sa provenance déterminée par les résultats de la classification obtenue (*cf.* 2.3 du Chapitre III), par le terme « Catégorie V » et son devenir aromatique déterminé par les résultats de l'analyse sensorielle obtenus (*cf.* 1.2 du Chapitre III) par le terme « catégorie boisson », tout ceci sous la forme d'un regroupement « Catégorie V catégorie boisson ». Par exemple, l'échantillon λ qui par sa composition biochimique en café vert appartient à la catégorie « Sublime » et qui par sa composition aromatique appartient à la catégorie « Authentique » sera noté « SuVau ». Ce tableau regroupe la valeur moyenne des concentrations (mg/L pour les composés aromatiques et % de matière sèche pour les composés biochimiques) des composés discriminants identifiés (*cf.* 2.3 et 3.2.2 du Chapitre III), pour tous les échantillons appartenant à chaque regroupement. La moyenne des concentrations des composés pour chacun des deux termes de regroupement comme par exemple la « Moyenne Su » est la moyenne des concentrations de

chaque composé aromatique issu des regroupements « SuVsu », « GrVsu » et « AuVsu » ou encore la « Moyenne GrV » est la moyenne des concentrations de chaque composé biochimique issu des regroupements « GrVgr », « GrVsu » et « GrVau ».

Tableau XLIV :
Concentration en mg/L des composés aromatiques et teneur en % de matière sèche des composés biochimiques des cafés
sous leur forme de regroupement respectif.

Composés aromatiques	GrVgr	SuVsu	AuVau	GrVau	GrVsu	SuVau	AuVgr	AuVsu	Moyenne "gr"	Moyenne "su"	Moyenne "au"
(<i>E,Z</i>)-hepta-2,4-diéнал	1,35	1,02	0,66	0,75	0,94	0,64	1,04	1,05	1,20	1,00	0,68
(<i>E,E</i>)-nona-2,4-diéнал	1,41	1,04	0,95	1,27	1,26	1,04	1,3	1,06	1,36	1,12	1,09
2-méthylbutanal	0,93	0,61	0,31	0,16	0,7	0,12	0,75	0,44	0,84	0,58	0,20
3-méthylbutanal	1,09	0,75	0,31	0,2	0,8	0,11	0,95	0,56	1,02	0,70	0,21
1-éthyl-3-méthylbenzène	0,21	0,13	0,07	0,08	0,14	0,08	0,17	0,1	0,19	0,12	0,08
β - <i>trans</i> -ocimène	1,76	0,61	0,49	0,48	0,67	0,31	1,7	0,65	1,73	0,64	0,43
2-phénylacétaldéhyde	0,82	1,18	0,21	0,17	1,08	0,3	0,78	0,99	0,80	1,08	0,23
1-méthylpyrrole	0,94	1,92	1,04	1,12	1,73	1,31	0,75	1,89	0,85	1,85	1,16
β - <i>cis</i> -ocimène	1,31	2,3	0,96	1,01	2,21	1,01	1,21	1,99	1,26	2,17	0,99
2-acétylthiazole	0,5	1,06	0,16	0,2	0,91	0,24	0,46	0,78	0,48	0,92	0,20
acétaldéhyde	0,95	0,8	4,87	3,06	0,71	2,44	1,14	0,75	1,05	0,75	3,46
linalol	1,01	0,93	1,02	1,18	0,19	1,35	0,98	0,56	1,00	0,56	1,18
décanal	0,74	0,8	1,3	1,37	1,27	1,27	0,81	1,12	0,78	1,06	1,31
hexanal	0,44	0,81	1,79	1,64	0,95	1,98	0,49	0,71	0,47	0,82	1,80
<i>p</i> -xylène	0,48	1,19	3,15	2,85	1,15	3,01	0,54	1,34	0,51	1,23	3,00
2,3,5-triméthylpyrazine	4,45	5,95	7,22	8,56	5,51	9,56	4,23	5,71	4,34	5,72	8,45
2,3-diméthyl-5-éthylpyrazine	0,15	0,15	0,53	0,45	0,27	0,23	0,17	0,28	0,16	0,23	0,40
2,6-diéthylpyrazine	0,15	0,69	0,69	0,95	0,25	0,78	0,28	0,28	0,22	0,41	0,81
2-éthyl-5-méthylpyrazine	4,75	4,81	6,47	7,6	2,94	8,61	5,2	3,98	4,98	3,91	7,56
3-éthyl-2,5-diméthylpyrazine	0,72	0,75	1,28	1,4	0,39	1,64	0,83	0,78	0,78	0,64	1,44
Composés biochimiques	GrVgr	SuVsu	AuVau	GrVau	GrVsu	SuVau	AuVgr	AuVsu	Moyenne "GrV"	Moyenne "SuV"	Moyenne "AuV"
C16:0	5,37	4,92	4,83	5,35	5,21	4,87	5,10	5,08	5,31	4,90	5,00
C18:2 cc	7,04	6,35	6,19	7,03	6,75	6,19	6,48	6,33	6,94	6,27	6,33
glucose	0,03	0,06	0,02	0,04	0,05	0,05	0,02	0,04	0,04	0,05	0,03
3,4-diCQA	0,12	0,14	0,16	0,12	0,12	0,15	0,12	0,16	0,12	0,15	0,15
Σ acides gras /glu.	338,51	303,73	793,73	577,29	379,91	318,39	342,64	662,88	431,90	311,06	599,75
Σ acides chloro. /glu.	101,03	155,92	372,86	178,06	153,85	161,60	252,98	317,15	144,31	158,76	314,33

Dans le tableau XLIV, les résultats issus des deux premières études sur les critères de différenciation entre les trois catégories commerciales en terme, soit de composition biochimique, soit de composition aromatique sont retrouvés.

Dans la première partie du tableau, les 20 composés aromatiques qui discriminent les trois catégories commerciales sont les suivants :

- Les composés (*E,Z*)-hepta-2,4-diéнал jusqu'au β -*trans*-ocimène qui ont une valeur plus élevée pour la concentration « Moyenne gr » sont les composés plus spécifiques des cafés « Grand cru »,
- Les composés 2-phénylacétaldéhyde jusqu'au 2-acétylthiazole obtiennent la valeur la plus élevée pour la concentration « Moyenne su » sont bien les composés caractérisant le plus les cafés « Sublime »,
- Les composés de l'acétaldéhyde jusqu'au 3-éthyl-2,5-diméthylpyrazine détiennent la valeur la plus élevée pour la teneur « Moyenne au » et sont donc les composés caractéristiques des cafés classés « Authentique ».

Dans la deuxième partie du tableau, les composés biochimiques qui ont permis de classer nos cafés verts dans les trois catégories commerciales sont retrouvés :

- les acides gras C16:0 et C18:2 cc, composés biochimiques caractéristiques des « Grand cru » ont la valeur la plus élevée pour la concentration « Moyenne GrV »,
- les rapports Σ acides chloro. /glu. et Σ acides gras /glu. qui discriminent les cafés « Authentique » des deux autres catégories ont les valeurs les plus élevées pour la teneur « Moyenne AuV »,
- le glucose qui caractérise les cafés « Sublime » a la valeur la plus élevée pour la teneur « Moyenne SuV ».

Il faut également noter que l'isomère de l'acide chlorogénique, le 3,4-diCQA qui est aussi à l'origine de la différenciation entre le groupe des cafés classés « Sublime », « Authentique » et les cafés « Grand cru », a la valeur la plus élevée pour les concentrations « Moyenne SuV » et « Moyenne AuV ».

Ces résultats de différenciation aromatique et biochimique entre les trois catégories commerciales sont en accord avec les résultats trouvés dans les études précédentes de ce travail de thèse et ce, quelque soit la provenance biochimique ou le devenir aromatique des cafés mis en relief ici par les regroupements.

Cependant il était également intéressant dans la suite de cette étude de confronter par le biais des regroupements, la provenance et le devenir aromatique en s'appuyant sur les mécanismes de génération d'arômes.

4.3. Génération des composés aromatiques typiques de chaque catégorie commerciale

Une AFD a été effectuée en prenant comme variables qualitatives les 186 échantillons sous leur forme de regroupement « Catégorie V catégorie boisson » avec comme variables quantitatives la teneur des composés biochimiques et aromatiques du tableau XLV. Les 186 échantillons sont ceux issus des résultats de l'étude sur les critères de différenciation entre les trois catégories commerciales en terme de composition biochimique du café vert. Les représentations graphiques selon les axes F1/F2 et F1/F3 sont données à la figure 30.

Tableau XLV

Contribution des différentes variables aux deux composantes F1 et F2 de l'AFD réalisée sur les 186 échantillons de café boisson « Bourbon Pointu ».

N° du composé	Nom du composé	F1	F2	F3
1	acétaldéhyde	-0,485	0,307	0,175
2	linalol	-0,157	-0,241	-0,080
3	(E,Z)-hepta-2,4-diéнал	0,255	-0,166	-0,043
4	(E,E)-nona-2,4-diéнал	0,355	0,087	0,086
5	2-méthylbutanal	0,414	0,259	0,025
6	2-phénylacétaldéhyde	0,373	-0,185	-0,047
7	décanal	-0,361	0,045	-0,039
8	hexanal	-0,454	-0,063	-0,041
9	3-méthylbutanal	0,431	0,293	0,032
10	1-éthyl-3-méthylbenzène	0,276	0,337	-0,062
11	p-xylène	-0,364	-0,190	-0,027
12	2,3,5-triméthylpyrazine	-0,402	-0,298	-0,160
13	2,3-diméthyl-5-éthylpyrazine	-0,286	0,408	0,221
14	2,6-diéthylpyrazine	-0,347	-0,295	-0,111
15	2-éthyl-5-méthylpyrazine	-0,450	-0,275	-0,078
16	3-éthyl-2,5-diméthylpyrazine	-0,513	-0,234	-0,126
17	1-méthylpyrrole	-0,074	-0,343	-0,165
18	β-cis-ocimène	0,528	-0,002	-0,147
19	β-trans-ocimène	0,354	0,382	0,045
20	2-acétylthiazole	0,435	-0,167	-0,039
	C16:0	-0,080	0,050	0,754
	C18:2 cc	-0,071	-0,012	0,670
	glucose	0,069	-0,746	0,160
	3,4-diCQA	-0,115	0,182	-0,213
	acides gras /glu.	-0,211	0,811	0,000
	acides chloro. /glu.	-0,225	0,826	-0,031

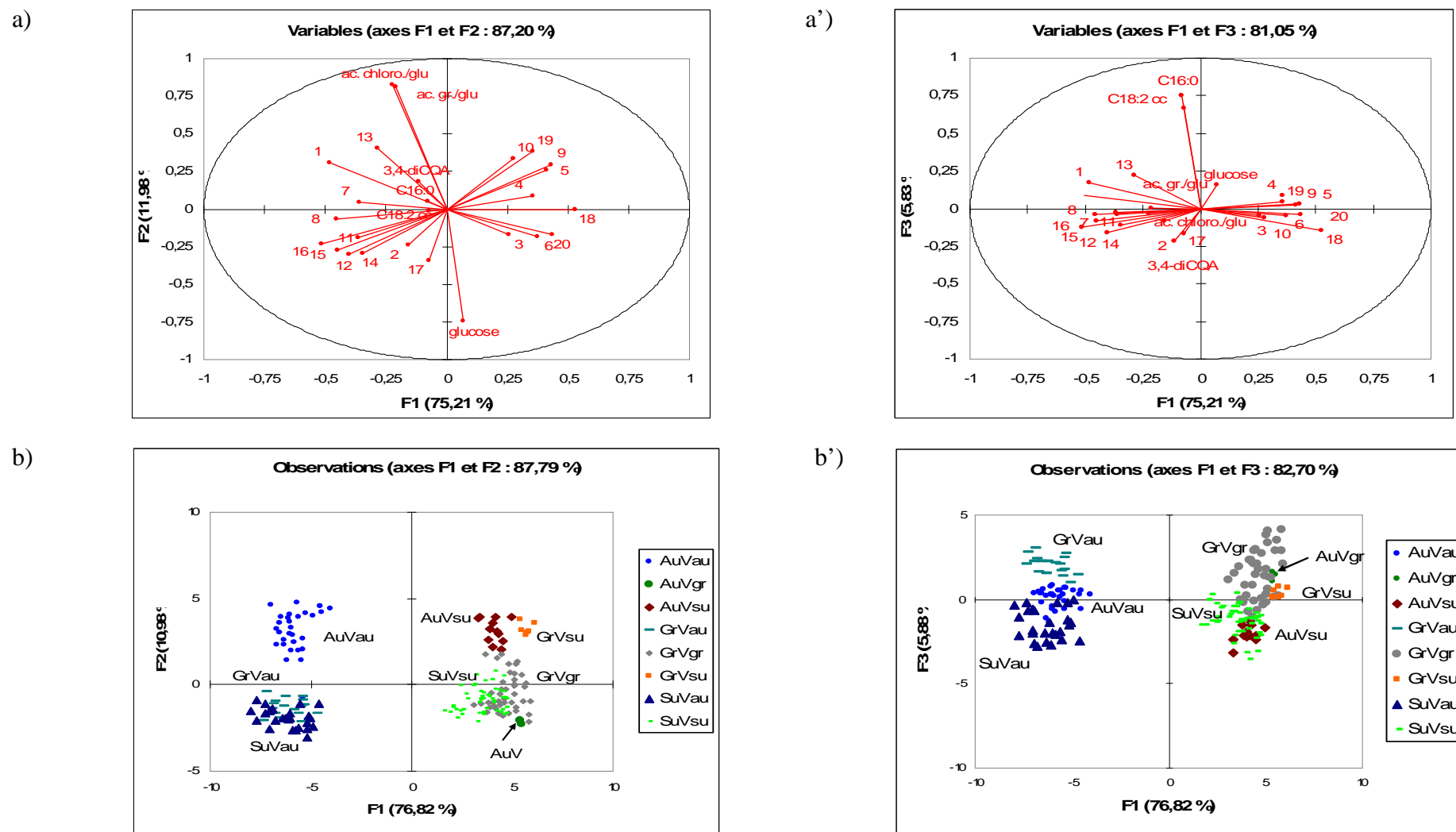


Figure 30 : Représentation graphique de l'analyse factorielle discriminante sur les échantillons du café « Bourbon Pointu ».

a) – a') Représentation de la construction des axes 1, 2 - des axes 1, 3 et visualisation des vecteurs propres de l'AFD.

b) – b') Répartition des individus du café « Bourbon Pointu » sur l'axe 1, 2 et sur l'axe 1, 3 de l'AFD.

Concernant les composés biochimiques du café vert, l'axe F2 qui est corrélé positivement par les deux rapports Σ acides chloro. /glu. et Σ acides gras /glu. et négativement par le glucose. L'axe F3 est corrélé positivement à la teneur des deux acides gras C16:0 et C18:2 cc.

Concernant les composés aromatiques du café torréfié boisson, l'axe F1 est corrélé positivement par le (*E,E*)-nona-2,4-diéanal, le 2-méthylbutanal, le 3-méthylbutanal (composés spécifiques des « Grand cru »), le β -*cis*-ocimène et le 2-acétylthiazole (composés spécifiques des cafés « Sublime ») et négativement par l'hexanal, le 2,3,5-triméthylpyrazine, le 2-éthyl-5-méthylpyrazine, le 3-éthyl-2,5-diméthylpyrazine (composés spécifiques des cafés « Authentique »).

Par rapport à l'axe F1, une nette discrimination est observée entre les cafés au devenir « Authentique » et les cafés au devenir « Grand cru » et « Sublime » en fonction des composés aromatiques respectifs à chaque catégorie commerciale, quelque soit leur catégorie commerciale de provenance.

Par rapport à l'axe F3, une discrimination est à noter entre les cafés de provenance « Grand cru » et les cafés de provenance « Sublime » et « Authentique », excepté pour les cafés dont le regroupement est « AuVgr », dans la mesure où les premiers sont plus riches en acides gras C16:0 et C18:2 cc comparés aux deux autres.

L'AFD confirme les résultats obtenus dans le tableau XLIV, en ce qui concerne la répartition des cafés selon les concentrations en molécules aromatiques et souligne une nette discrimination entre le groupe des cafés des catégories « Grand cru », « Sublime » et ceux de la catégorie « Authentique ». En effet, les cafés en tasse des catégories « Grand cru » et « Sublime » ont des teneurs plus élevées pour les composés aux numéros suivants (3, 4, 5, 6, 9, 10, 18, 19, 20) tandis que les cafés « Authentique » génèrent des concentrations plus élevées en composés (1, 2, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17).

A ce stade, il était nécessaire de se focaliser sur les différents regroupements afin de mettre en évidence les différentes corrélations entre la provenance, c'est-à-dire la composition biochimique et le devenir aromatique des cafés des trois catégories commerciales. Le tableau XLVI récapitule les caractéristiques de chaque regroupement en terme de modalités pédoclimatiques (type de transformations post-récolte et classe d'altitude).

Tableau XLVI
Caractéristiques des regroupements en terme de modalités pédoclimatiques
(type de transformations post-récolte et classe d'altitude).

Modalité	GrVgr	SuVsu	AuVau	GrVau	GrVsu	SuVau	AuVgd	AuVsu
Transformation								
A	18	18	0	0	6	0	3	9
C	24	27	0	0	0	0	0	3
E	0	3	12	12	0	15	0	0
G	0	0	18	6	0	12	0	0
Altitude								
1 : < 1000m	27	9	12	18	3	3	0	0
2 : < 850m	15	18	9	0	0	18	3	3
3 : < 650m	0	21	9	0	3	6	0	9

Le lien entre la provenance biochimique et le devenir en tasse provient dans un premier temps du facteur altitude, donc relié à la température ambiante et dans un deuxième temps au type de transformation post-récolte. En effet, d'après l'étude de Joët *et al.* (2010) [56] sur les influences de l'environnement et du traitement post-récolte sur la composition en café vert du « Bourbon Pointu », d'une part, l'altitude est corrélée négativement avec les concentrations en isomères de l'acide chlorogénique, le 4-CQA et le 3,4-diCQA et positivement avec les concentrations en acides gras C18:2 cc et C16:0. D'autre part, le type de transformation post-récolte utilisée dans l'étude de Joët *et al.* (2010) [56], une transformation humide (fermentation : 24h ; macération : 15h ; trempage : 12h), qui est similaire à nos transformations C et A, a pour effet d'augmenter la teneur en ces acides gras.

L'examen des tableaux XLIV et XLVI montre que :

- Les cafés « GrVgr » qui ont leurs teneurs les plus élevées en C16:0 et C18:2 cc et la teneur la plus faible en 3,4-diCQA, sont issus majoritairement des hautes altitudes et ont subi les transformations A et C.
- Les cafés « SuVsu » qui ont des teneurs moyennes en C16:0 et C18:2 cc et 3,4-diCQA, proviennent des altitudes 2 et 3 (< 850 m) et ont subi les transformations A et C.
- Les cafés « AuVau », bien qu'ils soient issus légèrement plus à l'altitude 1, ils ont tous subi les types de transformations E et G, d'où les teneurs les plus faibles en C16:0 et C18:2 cc et la teneur la plus élevée en 3,4-diCQA.

➤ Les cafés au devenir des cafés « Grand cru »

D'après le tableau XLIV et l'AFD, les cafés en tasse « Grand cru » ne proviennent que des cafés classés « Grand cru » en terme de composition biochimique, excepté pour trois échantillons de cafés en tasse « Grand cru » qui proviennent de la classe de cafés « Authentique ». Les deux acides gras C16:0 et C18:2 cc sont les composés biochimiques qui différencient les cafés verts « Grand cru » des deux autres et sont donc à l'origine des composés aromatiques typiques des « Grand cru ». Parmi les composés aromatiques spécifiques aux cafés « Grand cru », on compte quatre aldéhydes, cette classe de composés a le plus souvent comme précurseurs soit les lipides soit les sucres et les acides aminés [57, 58]. Le (*E,Z*)-hepta-2,4-diéнал et le (*E,E*)-nona-2,4-diéнал qui sont des aldéhydes insaturés à longue chaîne aliphatique appartiennent à la sous-famille des 2,4-alcanedial qui sont générés par des réactions d'oxydation lipidique. Le (*E,Z*)-hepta-2,4-diéнал est connu comme un produit issu de l'ester de l'acide linoléique : le linoléate [59]. Tandis que le (*E,E*)-nona-2,4-diéнал est formé à partir d'hydroperoxydes de linoléate, ester de l'acide linoléique [60, 61] comme le montre la figure 31.

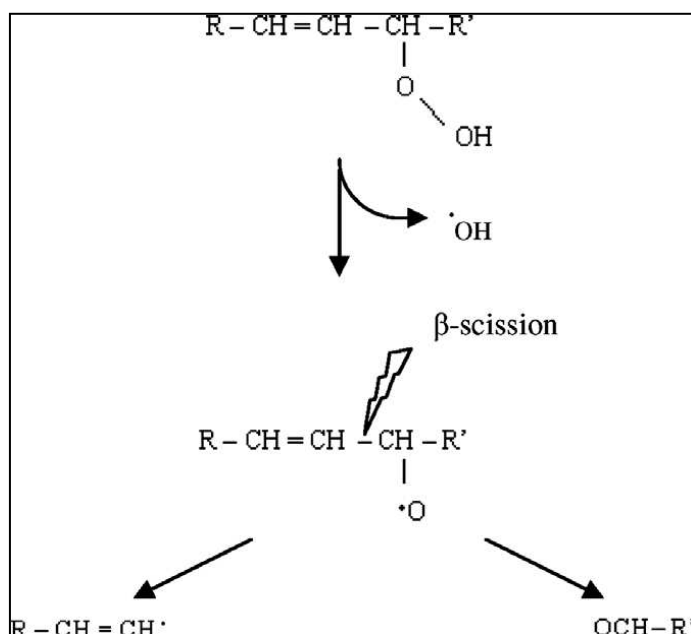


Figure 31 : Formation de composés aromatiques issus de la dégradation des hydroperoxydes

Les aldéhydes, 2-(ou 3-)méthylbutanal qui sont des aldéhydes à courte chaîne aliphatique sont générés par la réaction de Strecker, cette réaction qui produit des composés carbonylés par une dégradation d'acides aminés fait partie de la réaction de Maillard. En effet, le 2-méthylbutanal est le produit de la dégradation de l'isoleucine et le 3-méthylbutanal est produit par la dégradation de la leucine [62, 63] comme le montre la figure 33.

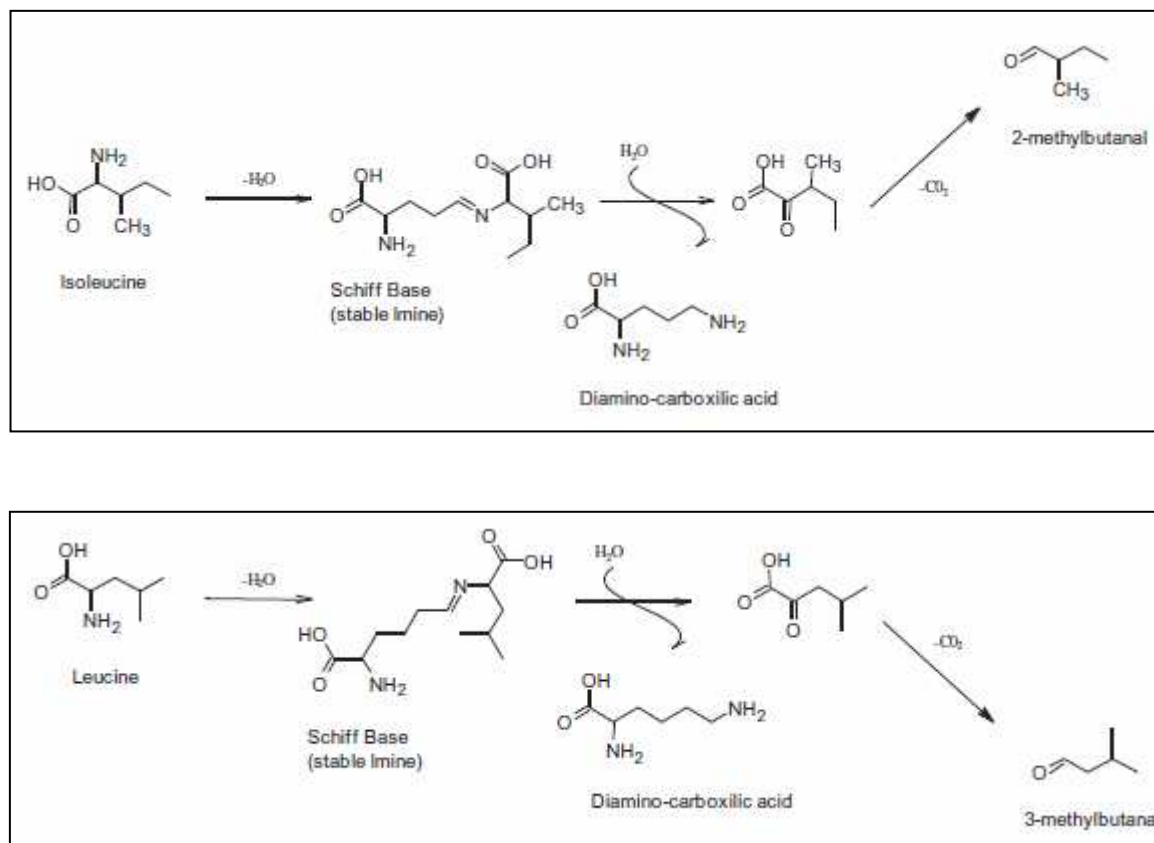


Figure 32 : Formation du 2-méthylbutanal et du 3-méthylbutanal respectivement à partir de l'isoleucine et de la leucine.

On peut supposer alors que les cafés verts classés « Grand cru » ont une teneur en acides aminés bien particulière, cependant aucune donnée sur la composition en acides aminés du café vert « Bourbon Pointu » n'est disponible.

En plus des quatre aldéhydes qui composent l'arôme des cafés « Grand cru », il y a le composé terpénique, β -*trans*-ocimène. Ce composé est présent originellement dans les plantes et est généré par une réaction enzymatique grâce notamment à la terpène synthétase. Le mécanisme réactionnel commence par l'ionisation du diphosphate de géranyle suivi d'une déprotonation du carbocation de géranyle [64, 65] comme l'indique la figure 33. On retrouve le β -*trans*-ocimène le plus souvent dans les plantes suivantes : l'*Arabidopsis thaliana*, le *Citrus unshiu*, le *Lotus japonicus* et le *Phaseolus lunatus*.

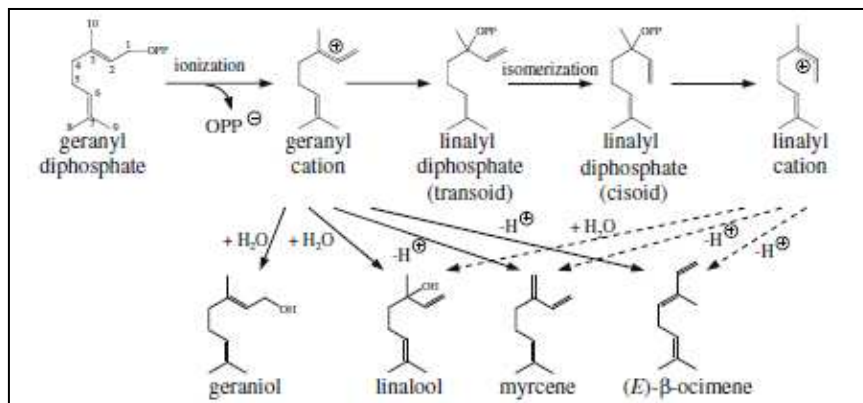


Figure 33 : Mécanisme simplifié de formation des monoterpènes à partir du diphosphate de géranyle.

Enfin, les trois échantillons de cafés « AuVgr » ont des moyennes en C16:0 et C18:2 cc (composés spécifiques des cafés « Grand cru ») plus élevées, à cause de la transformation A subite, et des moyennes des deux rapports Σ acides chloro. /glu. et Σ acides gras /glu. (composés spécifiques des cafés « Authentique ») plus faibles comparées à la valeur « Moyenne AuV » et aux moyennes des deux autres regroupements « AuVau » et « AuVsu ». D'où un rapprochement de ces concentrations en composés aromatiques vers les composés aromatiques spécifiques aux cafés « Grand cru ».

➤ Les cafés au devenir des cafés « Sublime »

D'après le tableau XLIV, les cafés en tasse « Sublime » proviennent des cafés classés « Sublime », « Authentique » et « Grand cru » en terme de composition biochimique et l'AFD révèle que ces cafés sont regroupés avec les cafés en tasse « Grand cru » et se distinguent des cafés en tasse « Authentique ». Les composés majoritaires des cafés en tasse « Sublime » sont le 2-phénylacétaldéhyde, le 1-méthylpyrrole, le 2-acétylthiazole et le β -cis-ocimène. Le premier composé est issu de la dégradation de l'acide aminé, la phénylalanine [66], le 2-acétylthiazole provient de la dégradation de la cystéine [67] tandis que le β -cis-ocimène qui est le stéréoisomère du β -trans-ocimène est le produit d'une réaction enzymatique grâce notamment à la terpène synthétase (figure 33). Le 1-méthylpyrrole fait partie de la famille des pyrroles, composés hétérocycles qui peuvent être formés, soit par l'interaction de composés 1,4-dicarbonylés avec des amines, réaction connue sous le nom de « synthèse de Paal-

Knorr », soit par la réaction de composés β -dicétones avec des composés α -halogéno-carbonylés en présence d'amines, réaction connue sous le nom de « synthèse Hantzsch ». Cependant la voie principale de génération des pyrroles est une condensation aldolique de composés α -aminocarbonylés avec des cétones ou des aldéhydes [68]. Le glucose qui est le composé biochimique qui différencie les cafés « Sublime » des cafés des deux autres catégories commerciales pourrait être aussi le précurseur principal des composés aromatiques des cafés « Sublime » qui ont pour mécanisme de génération, la réaction de Maillard [69]. Cependant, il conviendrait de mesurer l'effet de la concentration des deux acides aminés, la phénylalanine et cystéine sur la génération des composés, le 2-phénylacétaldéhyde et le 2-acétylthiazole.

L'examen du tableau XLIV et de l'AFD, montre que le petit groupe de cafés en tasse « Sublime » dont la composition en café vert est classée parmi les « Grand cru », (GrVsu), a en effet des teneurs en acides gras C16:0, C18:2 cc (composés spécifiques aux cafés « Grand cru ») plus faibles. Ceci est dû à la présence d'échantillons issus de l'altitude 3, et une teneur en glucose (composé spécifique aux cafés « Sublime ») plus forte, par rapport à la valeur « Moyenne GrV » et aux moyennes des deux autres regroupements « GrVgr » et « GrVau ». D'où un rapprochement de ses concentrations en composés aromatiques vers les composés spécifiques aux cafés « Sublime ». De plus, les échantillons « AuVsu » ont une teneur en glucose plus forte par rapport à la valeur « Moyenne AuV » et aux moyennes des deux autres regroupements « AuVau » et « AuVgr », d'où un rapprochement de ces concentrations en composés aromatiques vers les composés spécifiques aux cafés « Sublime ».

➤ *Les cafés au devenir des cafés « Authentique »*

D'après l'AFD, les cafés au devenir « Authentique » sont nettement discriminés par rapport aux autres cafés de part leur composition aromatique. Cependant, parmi ces cafés en tasse « Authentique », nous avons certains de provenance « Authentique », d'autres de provenance « Sublime » et un dernier groupe de cafés de provenance « Grand cru ». Les composés typiques des cafés en tasse « Authentique » sont l'acétaldéhyde, le linalol, le décanal, l'hexanal, le *p*-xylène et cinq pyrazines : 2,3,5-triméthylpyrazine, 2,3-diméthyl-5-éthylpyrazine, 2,6-diéthylpyrazine, 2-éthyl-5-méthylpyrazine et 3-éthyl-2,5-diméthylpyrazine. L'acétaldéhyde peut être produit soit par la réaction de Strecker grâce à la dégradation de l'alanine soit par une oxydation lipidique et lors de la fermentation, l'acétaldéhyde est le principal précurseur de l'acide acétique [70], composé se retrouvant dans les cafés des trois

catégories commerciales. Le composé *p*-xylène encore appelé le 1,4-diméthylbenzène est issu, soit d'une oxydation de caroténoïdes, soit d'une oxydation d'acides polyinsaturés [71, 72], ou bien le *p*-xylène est un produit de l'acide benzoïque, ce dernier étant produit par la dégradation thermique des acides chlorogéniques [73] comme le montre la figure 34. Les acides chlorogéniques sont les principaux précurseurs des composés phénoliques qui sont relativement plus présents dans les cafés en tasse « Authentique » et leur apporte une saveur épicée.

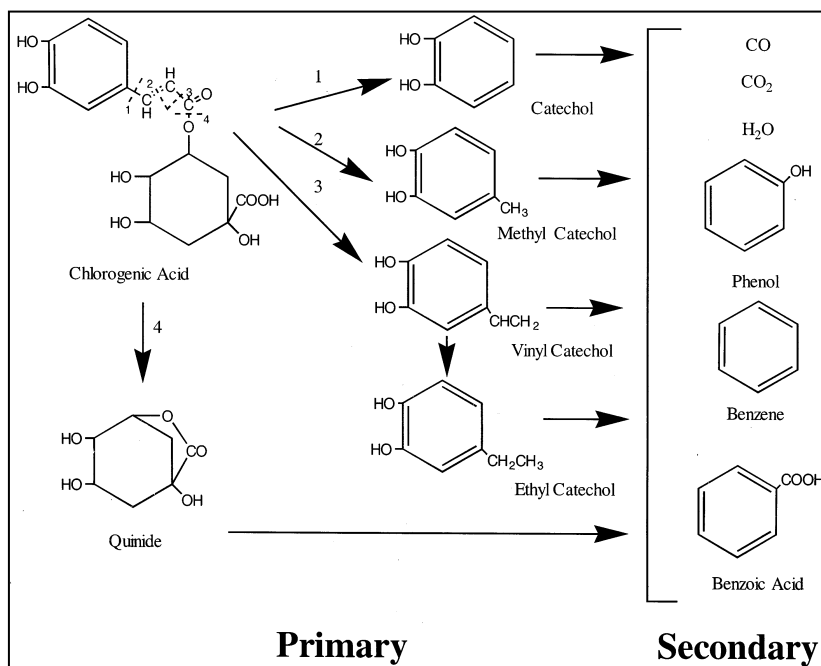


Figure 34 : Schéma simplifié de la formation des composés phénoliques et benzéniques à partir de l'acide chlorogénique.

Le linalol présent originellement dans les plantes est généré par une réaction enzymatique grâce notamment à la terpène synthétase comme les deux stéréoisomères de l'ocimène (figure 33). Le décánal comme le (*E,Z*)-hepta-2,4-diéнал est connu comme un produit issu de l'ester de l'acide linoléique alors que l'hexanal est un des produits de l'oxydation de l'acide linoléique.

Les composés pyrazines sont issus de la réaction de Maillard où les sucres et les acides aminés sont leurs principaux précurseurs. En effet, le squelette carboné des pyrazines dérive de la dégradation des sucres et la fraction azotée provient directement des acides aminés. Les pyrazines identifiées comme typiques des cafés en tasse « Authentique » appartiennent à la sous-famille des alkylpyrazines et sont générés majoritairement par la réaction de Strecker. Cette réaction met en jeu des composés dicarbonylés issus de la dégradation de l'acide ascorbique et fractions azotées issues de la dégradation d'acides aminés comme la sérine ou la

thréonine pour former des composés α -aminocarbonylés, précurseurs des pyrazines [74, 75, 76] comme le montre la figure 35.

Les cafés en tasse « Authentique » ont des teneurs en pyrazines plus importantes que celles des cafés en tasse des deux autres catégories commerciales. La première raison est l'éventuelle différence de concentration en terme d'acides aminés car ils sont le plus souvent des précurseurs spécifiques de composés. La deuxième raison proviendrait du fait que les cafés au devenir des cafés « Authentique » ont été légèrement plus torréfiés que les autres, ce qui engendrerait une augmentation des concentrations en pyrazines et, en même temps une diminution des teneurs des composés aldéhydes de faible poids moléculaire issus de la réaction de Strecker. Ces derniers pouvant être dégradés thermiquement et devenir des intermédiaires dans la formation des pyrazines. En effet, l'examen du tableau XLIV montre de plus faibles teneurs pour les trois aldéhydes issus de la réaction de Strecker, les 2- et 3-méthylbutanal et le 2-phénylacétaldéhyde issus des cafés en tasse « Authentique » en comparaison avec les cafés deux autres catégories.

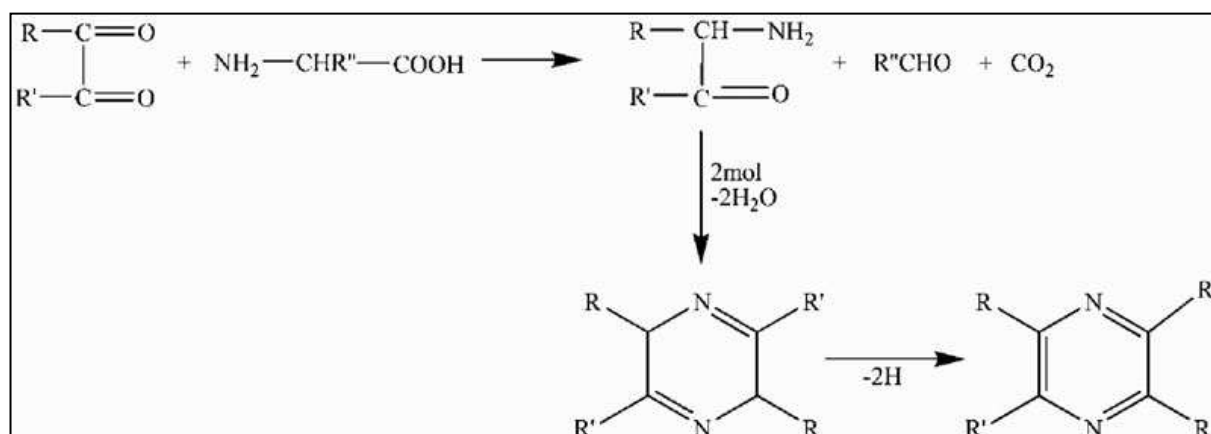


Figure 35 : Formation des pyrazines lors de la dégradation de Strecker.

Cependant, deux groupes de cafés au devenir des cafés en tasse « Authentique » ont pour provenance biochimique soit des cafés « Grand cru » soit des cafés « Sublime ».

L'examen du tableau XLIV et de l'AFD montre que le petit groupe de cafés en tasse « Authentique » dont la composition en café vert est classée parmi les « Grand cru », (GrVau), a en effet des teneurs des rapports Σ acides chloro. /glu. et Σ acides gras /glu (composés spécifiques aux cafés « Authentique ») plus élevées par rapport à la valeur « Moyenne GrV » et par rapport aux moyennes des deux autres regroupements « GrVgr » et « GrVsu ». D'où un rapprochement de ces concentrations en composés aromatiques vers les composés spécifiques aux cafés « Authentique ». De la même manière, les échantillons

« SuVau » ont des teneurs des rapports Σ acides chloro. /glu. et Σ acides gras /glu (composés spécifiques aux cafés « Authentique ») plus élevées par rapport à la valeur « Moyenne SuV » et aux moyennes de l'autre regroupement « SuVsu », d'où un rapprochement de ces concentrations en composés aromatiques vers les composés spécifiques aux cafés « Authentique ».

Conclusion

Dans ce dernier chapitre, plusieurs points ont été successivement abordés :

- Le classement des 216 échantillons de café boissons dans les trois catégories commerciales (+ de 85% des cafés étudiés) et non commerciale est effectué sur la base des notes des analyses sensorielles. 85% des échantillons sont classés dans les trois catégories commerciales : « Grand cru », « Sublime », « Authentique ». 15% des échantillons ne sont pas commercialisables et font partie de la catégorie « Triage ».
- La recherche de critères permettant la distinction des trois catégories commerciales (Grand cru, Sublime, Authentique) *via* la composition chimique du café vert ou la composition aromatique du café torréfié boisson. Une classification hiérarchique ascendante suivie d'une analyse en composantes principales, a montré que les acides gras présents dans le café vert notamment le C16:0 et le C18:2 cc sont signes d'excellence pour le café. La teneur de ces deux composés est plus élevée dans les cafés « Grand cru ». De même, un des isomères de l'acide chlorogénique, l'acide dicaféoyl-3,4-quinique (3,4-diCQA) est indicateur d'une qualité moindre. Sa concentration s'avère plus importante dans les cafés « Authentique » que dans les « Grand cru ». La recherche des composés ayant un impact olfactif plus important par le calcul de la valeur de l'OAV (Odor Activity Value) de chaque molécule volatile identifiée a permis une sélection de 22 composés aromatiques communs aux trois catégories caractérisant le café « Bourbon Pointu » par des notes atypiques, d'agrumes, de pomme et de pamplemousse. Une liste de molécules volatiles d'impact propre à chaque catégorie permet de donner une identité propre à chaque catégorie commerciale.
- Les corrélations entre les composés chimiques du café vert, les composés ayant un impact spécifique et les trois catégories commerciales ont aussi été étudiées. Les cafés « Grand cru » ont une composition en acide gras C16:0 et C18:2 et une teneur en 2,4-alcanedial remarquable. Les cafés « Sublime » sont caractérisés par la teneur en

glucose et en phénylacétaldéhyde et β -*cis*-ocimène. Les cafés « Authentique » ont des moyennes en acides chlorogéniques et en pyrazines plus importantes que les deux autres groupes.

- L'influence de la zone, de l'altitude ou du traitement post-récolte sur le classement en trois catégories commerciales est notable. La corrélation entre la provenance des cafés verts, la transformation post-récolte subie et les profils aromatiques obtenus pour chaque catégorie commerciale montre que la classe d'altitude la plus haute associée à une transformation A ou C favorisent les fortes teneurs en acides gras et, par conséquent, les cafés « Grand cru ». Ces conditions peuvent aussi faire basculer un échantillon d'une catégorie commerciale à plus haute valeur ajoutée vers une catégorie commerciale de plus basse valeur commerciale. La tendance inverse est également possible.

Références bibliographiques

1. Teuber R. Geographical indications of origin as a tool of product differentiation: the case of coffee. *Journal of International Food and Agribusiness Marketing*, **2010**, 22, 277-298.
2. Feria-Morales A. Examining the case of green coffee to illustrate the limitations of grading systems/expert tasters in sensory evaluation for quality control. *Food Quality and Preference*, **2002**, 13, 355-367.
3. Bisogni C. A., Ryan G. J., Regenstein J. M. *What is fish quality? Can we incorporate consumer perceptions?* Seafood quality determination. Ed. D. E. Kramer, & J. Liston, **1987**, 547-563.
4. Reilly T.I., York R.K. Sensory analysis application to harmonize expert assessors of fish products. Sylva, Gilbert, Shriver, Ann L., and Morrissey, Michael T. *Quality control and quality assurance for seafood*, **1994**, 120-124.
5. Chung J. Growing a Better Decaf. Inside the race to produce a naturally low-caffeine bean. *Wall Street Journal*, **2008**, p6.
6. Ribeiro J. S., Ferreira M. M. C., Salva T. J. G. Chemometric models for the quantitative descriptive sensory analysis of Arabica coffee beverages using near infrared spectroscopy. *Talanta*, 2011, 83, 1352-1358.
7. Gettler-Summa M., Pardoux C. *Symbolic Approaches for Three-way Data Analysis of Symbolic Data*. Ed. Springer, **2000**, 342-352.
8. Oliveira L. S., Franca A. S., Mendonça J. C. F., Barros-Junior M. C. Proximate composition and fatty acids profile of green and roasted defective coffee beans. *Food Science and Technology*, **2006**, 39, 235-239.
9. Ramalakshmi K., Rao L. J. M., Takano-Ishikawa Y., Goto M. Bioactivities of low-grade green coffee and spent coffee in different *in vitro* model systems. *Food Chemistry*, **2009**, 115, 79-85.
10. Mazzafera P. Chemical composition of defective coffee beans. *Food Chemistry*, **1999**, 64, 547-554.
11. Grosch W. *Specificity of the human nose in perceiving food odorants*. Frontiers of Flavour Science, Proceedings of the Ninth Weurman Flavour Research Symposium. Deutsche Forschungsanstalt für Lebensmittelchemie, Garching. Ed. Schieberle P. and Engel K.-H., **2000**, 213-219.
12. Grosch W. Detection of potent odorants in foods by aroma extract dilution analysis. *Trends Food Sci. Technol.*, **1993**, 4, 68-73.
13. Acree T.E. *Bioassays for Flavor*. Flavor Science. Sensible Principles and Techniques, ACS Professional Reference Book. Ed. Acree T.E. and Teranishi R., American Chemical Society, Washington, DC, **1993**, 1-20.
14. Miranda-Lopez R., Libbey L.M., Watson B.T., McDaniel M.R. Odor analysis of Pinot noir wines from grapes of different maturities by a gas chromatography-olfactometry technique (Osme). *J. Food Sci.*, **1992**, 57, 985-993.
15. Van Ruth S.M., Roozen J.P. Gas chromatography/sniffing port analysis and sensory evaluation of commercially dried bell peppers (*Capsicum annuum*) after rehydration. *Food Chem.*, **1994**, 51, 165-170.
16. Rothe M., Thomas B. Aroma of bread. Evaluation of chemical taste analyses with the aid of threshold value. *Z. Lebensm. Unters. Forsch.*, **1963**, 119, 302-310.
17. Mayer F., Czerny M., Grosch W. Sensory study of the character impact aroma compounds of a coffee beverage. *Euro Food Res. Technol.*, **2000**, 211, 272-276.
18. Semmelroch P., Grosch W. Analysis of roasted coffee powders and brews by gas chromatography-olfactometry of headspace samples. *Lebensm. Wiss. Technol.*, **1995**, 28, 310-313.

19. Semmelroch P., Grosch W. Studies on character impact odorants of coffee brews. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **1996**, 44, 537-543.
20. Devos, M., Patte, F., Rouault, J., Laffort, P., Van Gemert, L. J. *Standardized Human Olfactory Thresholds*, Oxford University Press: New York, **1990**.
21. Dharmawan J., Kasapis S., Sriramula P., Lear M. J., Curran P. Evaluation of aroma-active compounds in Pontianak orange peel oil (*Citrus nobilis* Lour. var. *microcarpa* Hassk.) by gas chromatography-olfactometry, aroma reconstitution and omission test. *J. Agric. Food Chem.*, **2009**, 57, 239-244.
22. Schuh C., Schieberle P. Characterization of the key aroma compounds in the beverage prepared from Darjeeling black tea: quantitative differences between tea leaves and infusion. *J. Agric. Food Chem.*, **2006**, 54, 916-924.
23. Ong P. K. C., Acree T. E. Gas chromatography-olfactometry analysis of lychee (*Litchi chinesis* Sonn.). *J. Agric. Food Chem.*, **1998**, 46, 2282-2286.
24. Buettner A., Schieberle P. Evaluation of key aroma compounds in hand-squeezed grapefruit juice (*Citrus paradisi* Macfayden) by quantitation and flavor reconstitution experiments. *J. Agric. Food Chem.*, **2001**, 49, 1358-1363.
25. Schnermann P., Schieberle P. Evaluation of key odorants in milk chocolate and cocoa mass by Aroma Extract Dilution Analyses. *J. Agric. Food Chem.*, **1997**, 45, 867-872.
26. Buttery R. G., Ling L. C. Additional studies on flavor components of corn tortilla chips. *J. Agric. Food Chem.*, **1998**, 46, 2764-2769.
27. Schieberle P., Hofmann T. Evaluation of the character odorants in fresh strawberry juice by quantitative measurements and sensory studies on model mixtures. *J. Agric. Food Chem.*, **1997**, 45, 227-232.
28. Escudero A., Campo E., Farina L., Cacho J., Ferreira V. Analytical characterization of the aroma of five premium red wines. Insights into the role of odor families and the concept of fruitiness of wines. *J. Agric. Food Chem.*, **2007**, 55, 4501-4510.
29. Culleré L., Escudero A., Cacho J., Ferreira V. Gas chromatography-olfactometry and chemical quantitative study of the aroma of six premium quality Spanish aged red wines. *J. Agric. Food Chem.*, **2004**, 52, 1653-1660.
30. Schutter D. P., Saison D., Delvaux F., Derdelinckx G., Rock J. M., Neven H., Delvaux F. R. Characterization of volatiles in Unhopped Wort. *J. Agric. Food Chem.*, **2008**, 56, 246-254.
31. Hognadottir A., Rouseff R. L. Identification of aroma active compounds in orange essence oil using chromatography-olfactometry and gas chromatography-mass spectrum. *Journal of Chromatography A*, **2003**, 998, 201-211.
32. Elss S., Preston C., Hertzog C., Heckel F., Richling E., Schreier P. Aroma profiles of pineapple fruit (*Ananas comosus* [L.] Merr.) and pineapple products. *LWT*, **2005**, 38, 263-274.
33. Du X., Qian M. Quantification of 2,5-dimethyl-4-hydroxy-3(2H)-furanone using solid-phase extraction and direct microvial insert thermal desorption gas chromatography-mass spectrum. *Journal of Chromatography A*, **2008**, 1208, 197-201.
34. Roscher R., Herderich M., Steffen J. P., Schreier P., Schwab W. 2,5-dimethyl-4-hydroxy-3[2H]-furanone 6'-O-Malonyl- β -glucopyranoside in strawberry fruits. *Phytochemistry*, **1996**, 43, 155-159.
35. Tieman D. M., Loucas H. M., Kim J. Y., Clark D. G., Klee H. J. Tomato phenylacetaldehyde reductases catalyse the last step in the synthesis of the aroma volatile 2-phenylethanol. *Phytochemistry*, **2007**, 68, 2660-2669.
36. Luna G., Morales M. T., Aparicio R. Characterization of 39 varietal virgin olive oils by their volatile compositions. *Food Chemistry*, **2006**, 98, 243-252.

37. Pohjanheimo T., Sandell M. A. Headspace volatiles contributing to flavor and consumer liking of wellness beverages. *Food Chemistry*, **2009**, *115*, 843-851.
38. Hayata Y., Sakamoto T., Maneerat C., Li X., Kozuka H., Sakamoto K. Evaluation of aroma compounds contributing to muskmelon flavor in Poparak Q extracts by Aroma Extract Dilution Analysis. *J. Agric. Food Chem.*, **2003**, *51*, 3415-3418.
39. Komthong P., Hayakawa S., Katoh T., Igura N., Shimoda M. Determination of potent odorants in apple by headspace gas dilution analysis. *LWT*, **2006**, *39*, 472-478.
40. Somboon P., Wyszynski B., Nakamoto T. Novel odor recorder for extending range of recordable odor. *Sensors and Actuators*, 2007, *121*, 583-589.
41. Silvan J. M., Van De Lagemaat J., Olana A., Del Castillo M. D. Analysis and biological properties of amino acid derivatives formed by Maillard reaction in food. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, **2006**, *41*, 1453-1551.
42. Van Boekel M. A. J. S. Formation of flavour compounds in the Maillard reaction. *Biotechnology Advances*, **2006**, *24*, 230-233.
43. Ames J. M. Applications of the Maillard reaction in the food industry. *Food Chem.*, **1998**, *62*, 431-439.
44. Jiang B., Liu Y., Bhandari B., Zhou W. Impact of caramelization on the glass transition temperature of several caramelized sugars. Part 1: Chemical analyses. *J. Agric. Food Chem.*, **2008**, *56*, 5138-5147.
45. Mabrouk A. F. *Flavor of browning reaction products*. Food Taste Chemistry. Ed. Boudreau J. C., American Chemical Society, **1979**, 115.
46. Frankel E. N. Lipid Oxidation. *Progress in lipid research*, **1980**, *19*, 1-22.
47. Frankel E. N. Volatile lipid oxidation products. *Progress in lipid research*, **1983**, *22*, 1-23.
48. Zheng X. Q., Nagai C., Ashihara H. Pyridine nucleotide cycle and trigonelline (*N*-methylnicotinic acid) synthesis in developing leaves and fruits of *Coffea Arabica*. *Physiologia Plantarum*, **2004**, *122*, 404-411.
49. Ashihara H. Metabolism of alkaloids in coffee plants. *Braz. J. of Plant Physiol.*, **2006**, *18*, No1.
50. Farah A., Donangelo C. M. Phenolic compounds in coffee. *Braz. J. Plant Physiol.*, **2006**, *18*, No1.
51. Stalmach A., Mullen W., Nagai C., Crozier A. On-line HPLC analysis of the antioxidant activity of phenolic compounds in brewed, paper-filtered coffee. *Braz. J. Plant Physiol.*, **2006**, *18*, No1.
52. Nebesny E., Budryn G., Kula J., Madja T. The effect of roasting method on headspace composition of robusta coffee bean aroma. *Eur. Food Res. Technol.*, **2007**, *225*, 9-19.
53. Moon J. K., Shibamoto T. Formation of volatile chemical from thermal degradation of less volatile coffee components: Quinic acid, caffeic acid, and chlorogenic acid. *J. Agric. Food Chem.*, **2010**, *58*, 5465-5470.
54. Bekedam E. K., Loots M. J., Shols H. A., Van Boekel M. A. J. S., Smit G. Incorporation of chlorogenic acids in coffee brew melanoidins. *J. Agric. Food Chem.*, **2008**, *56*, 2055-2063.
55. Delgado-Andrade C., Morales F. J. Unraveling the contribution of mélanoidines to the antioxidant activity of coffee brews. *L. Agric. Food Chem.*, **2005**, *53*, 1403-1407.
56. Joët T., Laffargue A., Descroix F., Doubeau S., Bertrand B., De Kochko A., Dussert S. (2010). Influence of environmental factors, wet processing and their interactions on the biochemical composition of green Arabica coffee beans. *Food Chemistry*, **2010**, *118*, 693-701.

57. Orozco A. L., Perez M. I., Rodriguez J., Hernandez M., Gonzalez-Vila F. J., Polvillo O., Arias M. E. Biotechnological enhancement of coffee pulp residues by solid-state fermentation with *Streptomyces*. Py-GC/MS analysis. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **2008**, *81*, 247-252.
58. Sucan M. K., Weerasinghe D. K. *Process and reaction flavors: an overview*. Ed. Sucan M. K., Weerasinghe D. K., American Chemical Society, **2005**, 1-23.
59. Varlet V., Prost C., Seot T. Volatile aldehydes in smoked fish: analysis methods, occurrence and mechanisms of formation. *Food Chemistry*, **2007**, *105*, 1536-1556.
60. Timm-Heinrich M., Nielsen N. S., Xu X., Jacobsen C. Oxidative stability of structured lipids containing C18:0, C18:1, C18:2, C18:3 or CLA in *sn*2-position – as bulk lipids and milk drinks. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, **2004**, *5*, 249-261.
61. Reiners J., Grosch W. Odorants of virgin olive oils with different flavor profiles. *J. Agric. Food Chem.*, **1998**, *46*, 2754-2763.
62. Frauendorfer F., Schierberle P. Changes in key aroma compounds of criollo cocoa beans during roasting. *J. Agric. Food Chem.*, **2008**, *56*, 10244-10251.
63. Estevez M., Ventanas S., Heinonen M. Formation of Strecker aldehydes between protein carbonyls (α -aminoadipic and γ -glutamic semialdehydes) and leucine and isoleucine. *Food Chemistry*, **2011**, *128*, 1051-1057.
64. Degenhardt J., Kollner T. G., Gershenzon J. Monoterpene and sesquiterpene synthases and the origin of terpene skeletal diversity in plant. *Phytochemistry*, **2009**, *70*, 1621-1637.
65. Schwab W., Williams D. C., Davis E. M., Croteau R. Mechanism of monoterpenes cyclization: stereochemical aspects of the transformation of noncyclizable substrate analogs by recombinant (-)-limonene synthase, (+)-bornyl diphosphate synthase, and (-)-pinene synthase. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, **2001**, *392*, 123-136.
66. Tieman D., Taylor M., Schauer N., Fernie A. R., Hanson A. D., Klee H. J. Tomato aromatic amino acid decarboxylases participate in synthesis of the flavor volatiles 2-phenylethanol and 2-phenylacetaldehyde. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **2006**, *103*, 8287-8292.
67. Yu H. Z., Chen S. S. Identification of characteristic aroma-active compounds in steamed mangrove crab (*Scylla serrata*). *Food Research International*, **2010**, *43*, 2081-2086.
68. Yaylayan V. A., Keyhani A. Elucidation of the mechanism of pyrrole formation during thermal degradation of ^{13}C -labeled L-serines. *Food Chemistry*, **2001**, *74*, 1-9.
69. Soares M., Christen P., Pandey A., Soccol C. R. Fruity flavour production by *Ceratocystis fimbriata* grown on coffee husk in solid-state fermentation. *Process Biochemistry*, **2000**, *35*, 857-861.
70. Cremer D. R., Eichner K. The reaction kinetics for the formation of Strecker aldehydes in low moisture model systems and in plant powders. *Food Chemistry*, **2000**, *71*, 37-43.
71. Rios J. J., Fernandez-Garcia E., Minguez-Mosquera M I., Perez-Galvez A. Description of volatile compounds generated by the degradation of carotenoids in paprika, tomato and marigold oleoresins. *Food Chemistry*, **2008**, *106*, 1145-1153.
72. Degenhardt A., Preiniger M., Ullrich F. Carotenoids as flavor precursors in coffee. *Developments in Food Science*, **2006**, *43*, 379-382.
73. Sharma R. K., Fisher T. S., Hajaligol R M. Effect of reaction conditions on pyrolysis of chlorogenic acid. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **2002**, *62*, 281-296.
74. Buron N., Coton M., Desmarais C., Ledauphin J., Guichard H., Baillier D., Coton E. Screening of representative cider yeast and bacteria for volatile phenol-production ability. *Food Microbiology*, **2011**, *1-9*.

75. Adams A., De Kimpe N. Formation of pyrazines from ascorbic acid and amino acids under dry-roasting conditions. *Food Chemistry*, **2009**, *115*, 1417-1423.
76. Yu A. N., Zhang A. D. The effect of pH on the formation of aroma compounds produced by heating a model system containing L-ascorbic acid with L-threonine/L-serine. *Food Chemistry*, **2010**, *119*, 214-219.

Conclusion Générale

Le café, *Coffea arabica* var. *laurina* plus connu sous le nom « Bourbon Pointu » ou café Leroy, déjà présent dans l'île au 18ème siècle et apprécié à la cour du Roi pour ses qualités organoleptiques a été choisi pour relancer, aujourd'hui, la culture du café et renouer avec cette tradition à La Réunion. Le classement du « Bourbon Pointu » dans la catégorie « Café gourmet » étant la finalité de cette relance, un certain nombre de facteurs allant dans ce sens ont été mis en avant dans ce travail de thèse.

Tout d'abord, la détermination de la *composition chimique* du café vert a confirmé l'appartenance du « Bourbon Pointu » au groupe des Arabicas, cafés plus réputés que les Robustas pour leur qualité gustative et, la majeure partie des cafés gourmets font partie de ce groupe. Les marqueurs de cette appartenance sont le saccharose, le ratio entre la proportion d'acide stéarique (C18:0) (1,01 %) et d'acide oléique (C18:1 n-9) (1,04%) proche de 1, la teneur en caféine (0,49-0,71%) inférieure à celle d'autres cafés Arabicas. L'acide féruloyl-5-quinique (5-CQA) est l'isomère majoritaire des acides chlorogéniques comme, c'est le cas pour l'espèce *Coffea arabica* var. *Bourbon*. Les résultats de l'Analyse Factorielle Discriminante (AFD) prenant en compte l'influence de l'année, de la zone de culture (Nord, Sud, Centre de l'île), de l'altitude (< 650 m, 650-850 m, 850 – 1000 m), du traitement post-récolte (fermentation de 12h ou de 24h, macération ou pas de 12h ou de 24h, trempage ou pas de 12h) ont montré, d'une part, que seule l'altitude est un paramètre prépondérant dans l'évolution de la composition chimique et que l'appartenance au groupe Arabica n'est pas remis en cause. D'autre part, le différentiel de température, de rayonnement lumineux et de pluviométrie entre les trois classes d'altitude peut expliquer les différences significatives des concentrations en acides gras et en trigonelline.

Puis, le choix des conditions du *diagramme de torréfaction* (210°C au départ suivi d'une descente en température pendant 3 minutes jusqu'à 160°C puis d'un isotherme à 160°C pendant 2 minutes) a permis d'optimiser l'expression des qualités aromatiques et de conférer une note fruitée marquée aux cafés. La micro-extraction en phase solide (SPME) des poudres de café et l'extraction en phase solide (SPE) des composés volatils des cafés boissons suivies de l'analyse de ces fractions volatiles en chromatographie gazeuse couplée à la spectrométrie de masse ont montré la prépondérance quantitative des furanes et des pyrazines sur la centaine de molécules identifiées. Les composés majoritaires communs aux poudres et aux boissons sont la 2-méthylpyrazine, le 2-furanméthanol, l'acide acétique, le 5-méthyl-2-furfural et le

furan-2-carbaldéhyde ; ces derniers étant les indicateurs de qualité d'un café appartenant au groupe Arabica.

Par rapport aux différents paramètres (année, zone de culture, altitude, traitement post-récolte), l'importance du traitement post-récolte a été mise en évidence par une Analyse Factorielle Discriminante en tenant compte de la composition aromatique des poudres et des cafés boissons qui en sont issus. Les résultats ont montré que chaque type de traitement favorise des classes de molécules volatiles bien précises.

Enfin, l'identification des molécules du café vert et du café torréfié, marqueurs des trois catégories commerciales : Grand Cru, Sublime, Authentique a permis une meilleure appréciation de l'appartenance du café à telle ou telle catégorie. Ainsi, l'analyse sensorielle des boissons obtenues à partir des cafés torréfiés, l'analyse des constituants volatils et la recherche des molécules d'impact par le calcul de leur « Odor Activity Value » (OAV) ont permis de distinguer les composés positifs (acides gras dont le C16 : 0 et le C18 : 2, glucose), des composés négatifs (trigonelline, caféine, acides chlorogénique dont l'acide dicaféoyl-3,4-quinique (3,4-diCQA)). Ces molécules considérées comme des précurseurs d'arômes conduisent lors de la torréfaction des cafés « Grand cru » à une plus grande richesse en aldéhydes insaturés et dans celle des cafés « Authentiques » à une plus grande richesse en pyrazines. Il a aussi été établi que la classe d'altitude associée à un traitement post-récolte adapté améliore la qualité organoleptique du café et conduit à un surclassement commercial du café. Ce surclassement pourrait provenir de l'évolution de la composition chimique du café vert, évolution qui dépend surtout de l'altitude et du traitement.

L'ensemble de ces résultats contribue donc à une meilleure connaissance du « Bourbon Pointu ». Cependant, certaines voies de générations d'arômes restent encore à expliciter ; la détermination, par exemple, de la composition en acides aminés constituerait un élément supplémentaire de discrimination. De même, la méthode utilisant les OAV est une première approche qui pourrait être complétée par d'autres méthodes olfactométriques.

De même, les corrélations mises à jour entre la qualité organoleptique/les précurseurs du café vert/les arômes générés par la torréfaction sont autant d'éléments pouvant servir d'outils prédictifs permettant l'appréciation de la qualité et le classement en catégories commerciales du « Bourbon Pointu » à partir de la composition chimique des grains verts ;

l'objectif étant de classer les cafés par un dosage rapide et simple des précurseurs pour rendre pérenne cette jeune filière.

Dans ce travail, la mise en évidence des relations entre le terroir et la composition chimique constitue une première contribution au projet de labellisation de type Indication Géographique Protégée (IGP) du café « Bourbon Pointu ».

Partie Expérimentale

1 - Echantillonnage

Les cafés *Coffea arabica* var. *laurina* appelé « Bourbon Pointu » utilisés pour cette étude sont issus de l'île de La Réunion. Ils ont été cueillis au cours des campagnes 2006 et 2007 sur 9 caféières différentes avec des paramètres géoclimatiques différents (3 zones géographiques et 3 classes d'altitude par zone) et 4 transformations post-récoltes différentes. L'ensemble des données est résumé dans le tableau XLVII.

La production du Bourbon Pointu est réalisée aux altitudes de 500-1200 mètres comme le montre la figure 36 représentant la cartographie des caféiculteurs et les trois zones géographiques de notre échantillonnage sur l'île de La Réunion.

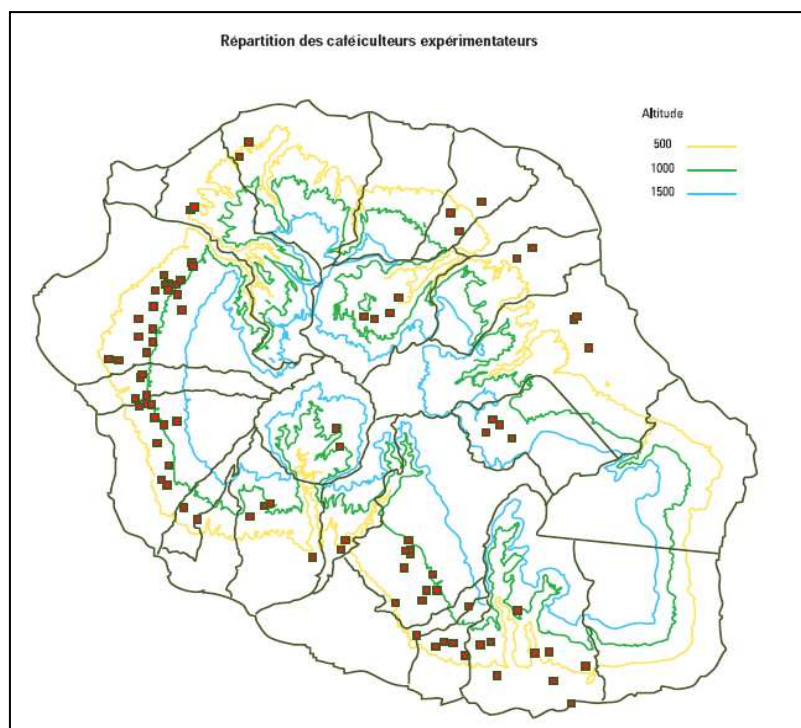


Figure 36 : Cartographie des caféiculteurs et des trois zones géographiques d'échantillonnage sur l'île de La Réunion.

Tableau XLVII
 Identification des cafés avec le numéro de caféière :
 classe d'altitude, type de sol et traitement post-récolte.

Zone	N° de Caféière	Date de récolte	Altitude (m)	Type sol	Traitement post-récolte
Hauts de l'ouest (N)					
	102	Juillet	604 (3) ¹	2 ^a	A, C, G, E
	9	Septembre	810 (2) ¹	4 ^c	A, C, G, E
	12	Janvier	980 (1) ¹	4 ^c	A, C, G, E
Hauts de Saint-Leu (C)					
	5	Juillet	585 (3) ¹	3 ^b	A, C, G, E
	29	Octobre	805 (2) ¹	4 ^c	A, C, G, E
	34	Janvier	985 (1) ¹	4 ^c	A, C, G, E
Sud (S)					
	49	Septembre	549 (3) ¹	3 ^b	A, C, G, E
	57	Octobre	805 (2) ¹	8 ^d	A, C, G, E
	66	Janvier	985 (1) ¹	4 ^c	A, C, G, E

2^a : sols ferrallitiques rouges fortement désaturés

()¹ : numéro de la classe d'altitude

3^b : sols bruns andiques épais sur cendres

4^c : andosols désaturés non perhydratés chromiques sur cendres

8^d : gratoirs à sols bruns andiques peu épais associés à andosols non perhydratés sur cendres

La transformation post-récolte utilisée est la transformation par voie humide ; cette dernière est la plus utilisée pour les cafés Arabica. Elle est caractérisée par la présence d'une étape de dépulpage et d'une étape de démulagination. Cette dernière étape est composée de phases sous eau et sans eau. Les quatre transformations post-récolte mises en œuvre dans l'étude se différencient par rapport à la présence ou non de ces phases et par rapport à leur durée.

Le tableau XLVIII indique les caractéristiques des quatre transformations avec une phase de fermentation (sans eau), une phase de macération et de trempage (changement d'eau).

Tableau XLVIII

Différentes phases des transformations post-récoltes, fermentation (sans eau), macération et trempage (changement d'eau) exprimées en cumul degré Celsius/heure.

	Dépulpage	Fermentation		Macération		Trempage		Lavage	Séchage
G	oui	< 600°	(24h)	(0h)		(0h)		oui	oui
A	oui	500-550°	(24h)	500-500°	(24h)	(0h)		oui	oui
E	oui	250-300°	(12h)	250-300°	(12h)	250-300°	(12h)	oui	oui
C	oui	500-550°	(24h)	500-550°	(24h)	250-300°	(12h)	oui	oui

78 lots de cafés composent ainsi l'échantillonnage. Chaque lot est extrait trois fois et chaque extrait est analysé une seule fois. Les données de chaque analyse issues d'une extraction sont considérées comme celles appartenant à un individu. Un extrait est donc dénommé « individu » ou « échantillon ». Dans ce mémoire, 216 extraits soit au total 216 « échantillons » ou « individus » sont étudiés.

2 - Protocoles d'analyses

2.1. Analyse de la composition biochimique du café vert

100 grammes de chaque lot de café vert déparché sont réduits en poudre dans un broyeur de marque Perten de type 3600 avec un tamis intérieur de 500µm. La poudre de café vert est conditionnée dans des sacs en aluminium sous vide et conservée à - 20°C jusqu'à utilisation.

2.1.1. Protocole d'analyse de la caféine et de la trigonelline

2.1.1.1. Extraction

0,5 grammes de chaque lot de café vert broyé sont mélangés à 20 mL d'eau ultrapure (18,2 MΩ.cm à 25°C, système Milli-Q). La poudre et l'eau sont chauffées sous reflux dans un bain marie à 80°C pendant 10 minutes [1-3]. Les solutions sont agitées manuellement toutes les 5 minutes. Les solutions sont refroidies jusqu'à une température de 25°C puis filtrées sur une membrane de cellulose, Wathman de porosité (0,2µm). L'extraction est répétée trois fois.

2.1.1.2. Analyse et identification

10 µL de la solution préparée en 2.1.1.1. sont injectés en CL-SM. L'analyse séparative de la caféine et de la trigonelline est réalisée à l'aide d'un chromatographe liquide à haute performance de marque Agilent 1100 équipée d'une colonne RP C18 de marque Merck d'une longueur de 25 m, d'un diamètre interne de 4,6 mm et d'une épaisseur de phase de 5 µm. Cette dernière est placée dans un four à 35°C. Le débit de la phase mobile est de 1,0 mL/min avec une pression en tête de colonne de 400 bars.

Les éluants constituant la phase mobile initialement filtrés et dégazés sont :

- pour l'éluant A : 93% d'eau à 0,1% acide acétique (Merck) et 7% méthanol (Merck),
- pour l'éluant B : 70% méthanol et 30% eau Milli-Q.

La séparation est réalisée grâce au mode de gradient de concentration suivant (Tableau XLIX) [4] :

Tableau XLIX
Gradient de concentration des éluants A et B utilisé pour l'analyse
de la caféine et de la trigonelline.

Durée en minutes	0	30	33	40
Eluant A (%)	100	0	0	100
Eluant B (%)	0	100	100	0

L'analyse est réalisée grâce au couplage de la colonne chromatographique à d'une part un détecteur UV-DAD aux longueurs d'ondes ciblées à 264 et à 272 nm et d'autre part à un spectromètre de masse de marque Agilent G1946 VL en mode API-ES (ionisation de type electrospray) et de polarité positive couvrant une gamme de masse de 50 à 400 uma.

2.1.1.3. Protocole de quantification

Le dosage de ces molécules est réalisé grâce à un étalonnage externe suivant une courbe de calibration obtenue grâce à trois solutions témoins de chaque molécule et de concentrations différentes. Ces dernières sont préparées à partir d'une solution-mère à 10 mM (Tableau L).

Tableau L
Concentration des trois solutions témoins à partir d'une solution mère à 10 mM.

Numéro de la solution	Concentration ($\mu\text{mol} / \text{L}$)	Rapport de dilution
1	1000	10
2	500	20
3	250	40

Les valeurs quantitatives des teneurs en caféine et en trigonelline ont été obtenues par l'équation de la droite d'étalonnage à l'absorbance respective de chacune des molécules, 264 nm pour la trigonelline, 272 nm pour la caféine.

2.1.2. Protocole d'analyse des isomères de l'acide chlorogénique

2.1.2.1. Extraction

1 gramme de café vert de chaque lot broyé est placé dans une fiole de 100 mL. 80 mL de méthanol 70% p/p (méthanol pur à 70% poids/poids dans l'eau distillée) et 0,5 mL d'acide acétique pur y sont ajoutés. Les solutions sont agitées par agitation magnétique pendant 16 heures à l'abri de la lumière et à température ambiante (25°C). Après 16 heures d'extraction, le volume des solutions est ajusté à 100 mL. Un volume exact de 50 mL de ces extraits méthanoliques est transféré dans une fiole de 100 mL puis complété avec du méthanol 70% p/p jusqu'au trait de jauge. Chaque lot est extrait trois fois.

Les solutions contenues dans les fioles sont filtrées puis injectées en CLHP.

2.1.2.2. Analyse et identification

Une chromatographie liquide à haute performance a été utilisée. Elle est équipée d'une colonne LiChrospher ODS2 de marque Merck, d'une longueur de 25 cm, d'un diamètre interne de 46 mm et d'une épaisseur de phase de 5 μm . Cette dernière est placée dans un four à 30°C. Le débit de la phase mobile est de 1,0 mL/min. Les éluants constituant la phase mobile, initialement filtrés et dégazés sont :

- pour l'éluant A : méthanol (Merck),
- pour l'éluant B : acide phosphorique de concentration 4mM. (Merck).

Le volume d'injection est de 20 μL et l'analyse dure 50 minutes. La séparation est réalisée grâce au mode de gradient de concentration (Tableau LI) :

Tableau LI
Gradient de concentration des éluants A et B utilisé pour l'analyse
des isomères de l'acide chlorogénique.

Durée en minutes	0	35	40	45	50	55
Eluant A (%)	5	75	100	100	5	5
Eluant B (%)	95	25	0	0	95	95

L'analyse est réalisée grâce au couplage de la colonne chromatographique à un détecteur ultraviolet à une longueur d'onde ciblée de 327 nm.

2.1.2.3. Protocole de quantification

Le dosage de ces molécules est obtenu grâce à une solution témoin préparée à partir d'un mélange standard d'acide caféique et d'isomères de l'acide chlorogénique :

- acide caféoyl-3-quinique (3-CQA)
- acide caféoyl-5-quinique (5-CQA)
- acide caféoyl-4-quinique (4-CQA)
- acide féruloyl-4-quinique (4-FQA)
- acide féruloyl-5-quinique (5-CQA)
- acide dicaféoyl-3,4-quinique (3,4-diCQA)
- acide dicaféoyl-3,5-quinique (3,5-diCQA)
- acide dicaféoyl-4,5-quinique (4,5-diCQA)

Cette solution témoin est injectée toutes les dix analyses. La solution témoin est préparée à partir de la solution standard de concentration 300 mg/L. Les valeurs quantitatives des teneurs des différents isomères sont obtenues par la calibration externe réalisée grâce à la solution témoin.

2.1.3. Protocole d'analyse des polysaccharides

Le protocole d'analyse des polysaccharides mis au point et utilisé par le CIRAD est adopté.

2.1.3.1. Extraction

2 grammes de café vert broyé de chaque lot sont placés dans des ballons de 100 mL. 80 mL d'eau distillée et quelques pierres ponce y sont ajoutés. L'ensemble est porté à

ébullition pendant 30 minutes. La solution est refroidie jusqu'à une température de 25°C. L'extraction est répétée trois fois sur chaque lot.

Les solutions sont filtrées sur Célite 545 de marque Labosi, puis ajustées à un volume de 100 mL avec de l'eau distillée. Les solutions sont ensuite purifiées sur une micro colonne C18 Bond Elut. Un volume exact de 1 mL de l'extrait est récupéré dans des fioles de 25 mL complétées par de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Les solutions contenues dans les fioles sont filtrées puis injectées en CLHP.

2.1.3.2. Analyse et identification

Un chromatographe liquide LC-20AB de marque Shimadzu est utilisé. Il est équipé d'une colonne Shim-pack VP-ODS d'une longueur de 15 cm, d'un diamètre interne de 46 mm et d'une épaisseur de phase de 5 µm. La phase mobile utilisée est de la soude à 150 mM. Les éluants utilisés sont l'eau ultra-pure et la soude : A (50%) / B (50%). Le volume d'injection est de 20 µL et l'analyse dure 10 minutes. L'identification des sucres est effectuée par un détecteur électrochimique muni d'une électrode en or utilisé en mode ampérométrie pulsée (E1 :+50mv t1 :400ms ; E2 :+750mv t2 :200ms ; E3 :-800mv t3 :300ms).

Le saccharose, le glucose et le fructose ont été identifiés en comparant leur temps de rétention par rapport à ceux des solutions témoins.

2.1.3.3. Protocole de quantification

Le dosage de ces molécules est réalisé grâce à une solution témoin, préparée à partir des standards de saccharose, glucose et fructose. La solution témoin est préparée à partir des solutions mères de saccharose, de glucose et de fructose, chacune de concentration 200mg/L (Tableau LII).

Cette solution témoin est injectée toutes les dix analyses.

Tableau LII
Préparation de la solution témoin utilisée pour l'analyse du saccharose, du glucose et du fructose.

Nom de la solution	Concentration (mg / L)	Rapport de dilution
Saccharose	40	5
Glucose	1	200
Fructose	1	200

Les valeurs quantitatives des teneurs en saccharose, glucose et fructose obtenues sont par la calibration externe réalisée grâce à notre solution témoin.

2.1.4. Protocole d'analyse des acides gras

L'extraction et la quantification de la matière grasse totale ont été réalisées grâce au protocole mis au point et utilisé par le CIRAD. Chaque lot est extrait trois fois.

2.1.4.1. Protocole de quantification de la teneur en matière grasse totale

4 grammes de café vert broyé de chaque lot sont placés dans des cartouches d'extraction en cellulose de marque Whatman (longueur externe de 80 mm et de diamètre interne de 33 mm). Le poids à vide des godets récoltant la matière grasse est déterminé. L'extraction est effectuée par un système d'extraction liquide-solide automatique, de type SOXTEC de marque Avanti, pendant 2 heures à 135°C avec de l'éther de pétrole (Merck).

Les godets sont, ensuite, placés à l'étuve (100°C) pendant 30 minutes et refroidis dans un dessiccateur pendant 30 minutes. Ils sont pesés et la différence de poids des godets à vide et contenant la matière grasse permet la détermination de la teneur en matière grasse totale.

2.1.4.2. Protocole de détermination de la composition et de la quantification des acides gras

2.1.4.2.1. Récupération de la matière grasse

Un volume exact de 5 mL d'éther de pétrole est ajouté dans les godets contenant la matière grasse totale. Ils sont, ensuite, placés dans un bac à ultrasons pendant 5 minutes, puis l'extrait est récupéré dans des vials de 10 mL.

Un aliquot de 1 mL de l'extrait est transféré dans un ballon de 25 mL et l'éther de pétrole résiduel contenu dans cet extrait est évaporé par bullage à l'azote. Cet aliquot est destiné à la préparation des esters méthyliques.

2.1.4.2.2. Préparation des esters méthyliques

Un volume exact de 3 mL de méthylate de sodium (Merck) et quelques pierres ponce sont ajoutés dans le ballon de 25 mL contenant la matière grasse totale préparée comme indiqué en 2.1.4.2.1 et le mélange est chauffé à ébullition pendant 10 minutes.

Ensuite, un volume exact de 3 mL de méthanol chlorhydrique (Merck) est ajouté et le mélange est chauffé à ébullition pendant 10 minutes. Après refroidissement du mélange à température ambiante, 10 mL d'hexane (Merck) et 10 mL d'eau distillée sont ajoutés dans le

ballon. La phase hexanique contenant les esters méthyliques d'acides gras est récupérée en vue de son analyse par chromatographie en phase gazeuse.

2.1.4.2.3. Identification et quantification des acides gras

Un chromatographe en phase gazeuse de marque FOCUS (Thermo électron corporation) muni d'un détecteur à ionisation de flamme est utilisé. La séparation est réalisée grâce à une colonne CP CIL 88 de marque Varian, d'une longueur de 50 m, d'un diamètre interne de 0,25 mm et d'une épaisseur de phase de 0,20 μm . L'injecteur et le détecteur sont à une température de 250°C. Le débit du gaz vecteur (hydrogène) est de 1 mL/min. Les acides gras sont séparés suivant la programmation de température suivante : température initiale de 150°C, programmation de température à raison de 5°C/ min jusqu'à 225°C et isotherme à 225°C pendant 10 minutes.

L'identification des acides gras est obtenue par comparaison de leurs temps de rétention relatifs à ceux d'une solution témoin d'acides gras. La quantification des différents acides gras est réalisée grâce à la calibration externe effectuée par une solution témoin d'acides gras, utilisée par le CIRAD, qui sont listés dans le tableau LIII.

Tableau LIII
Solution témoin d'acides gras utilisée pour l'analyse des acides gras.

Acides gras	Dénomination
Acides gras insaturés	
C16:1 <i>trans</i>	acide <i>trans</i> -palmitoléique
C16:1 <i>cis</i>	acide <i>cis</i> -palmitoléique
C18:1 ω -9	acide oléique
C18:1 ω -7	acide <i>cis</i> -vaccénique
C20:1 ω -9	acide gadoléique
Acides gras poly insaturés	
C18:2 <i>ct</i>	acide <i>cis, trans</i> -linoléique
C18:2 <i>cc</i>	acide <i>cis, cis</i> -linoléique
C18:3 ω -3	acide α -linolénique
C20:2 ω -6	acide 11, 14-eicosadiénoïque
Acides gras saturés	
C14:0	acide myristique
C16:0	acide palmitique
C16:0 <i>iso</i>	acide isopalmitique
C18:0	acide stéarique
C20:0	acide arachidique
C22:0	acide béhénique

2.2. Analyse de la composition aromatique du café torréfié en poudre

2.2.1. Torréfaction du café

100 grammes de chaque lot de café vert en grain sont torréfiés à l'aide d'un torréfacteur de marque Probat de type BRZ 2. Le profil de torréfaction utilisé est un profil de torréfaction descendant avec une température de départ à 210°C suivie d'une descente en température pendant 180 secondes à 160°C et d'un isotherme à 160°C pendant environ 100 secondes avant refroidissement des grains.

Les grains de café torréfié ainsi obtenus ont été réduits en poudre à l'aide d'un broyeur d'une machine à moudre de marque Ascaso. La poudre obtenue est conditionnée dans des sacs en aluminium sous vide et conservée à -20°C jusqu'à utilisation.

La méthode de microextraction en phase solide (SPME) est utilisée pour analyser la composition aromatique du café torréfié en poudre. Trois microextractions en phase solide sont réalisées sur chaque lot.

2.2.2. Préparation de l'échantillon

2 grammes de café torréfié en poudre sont placés dans un vial de 10 mL. 3 mL d'eau ultrapure (18,2 MΩ.cm à 25°C, système Milli-Q) et une quantité déterminée d'étalon interne dissous dans de l'éthanol y sont ajoutés :

- pour la colonne polaire : 1 mL de *trans*-oct-2-énal de concentration 55 mg/L
- pour la colonne apolaire : 50 µL de butan-1-ol de concentration 2,2 g/L

2.2.3. Extraction des composés aromatiques volatils

Le vial serti est placé à l'étuve à 50°C pendant 10 minutes. Au bout des 10 minutes, la fibre Carboxen / PDMS (75µm) est insérée dans le vial. L'adsorption des composés d'arôme sur la fibre est réalisée à l'étuve à 50°C pendant 45 minutes. La fibre est insérée dans l'injecteur de la chromatographie en phase gazeuse en mode splitless pendant 4 minutes à une température de 250°C.

2.2.4. Séparation, identification et quantification

2.2.4.1. Colonne polaire

L'analyse séparative des composés d'arôme est réalisée à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse de marque Agilent 6890 N équipé d'une colonne polaire DB-WAX d'une longueur de 60 m, d'un diamètre interne de 320 µm et d'une épaisseur de phase de 0,25 µm. La température de la ligne de transfert est de 250°C et le débit de la phase mobile (He) est de 1 mL/min. L'injection est effectuée en mode splitless.

La programmation de température du four est la suivante : un isotherme à 40°C pendant 5 min suivi d'une programmation de température à raison de 3°C par minute jusqu'à 200°C et maintenue à 200°C pendant 10 minutes.

L'identification des molécules est réalisée grâce à un spectromètre de masse de marque Agilent 5973 N. Ce spectromètre fonctionne en mode ionisation à impact électronique (70eV). La gamme de masse balayée est comprise entre 25 et 400 uma.

2.2.4.2. Colonne apolaire

L'analyse séparative des composés d'arôme est réalisée à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse de marque Agilent 6890 N équipé d'une colonne apolaire SPB-5 d'une longueur de 60 m, d'un diamètre interne de 320 μm et d'une épaisseur de phase de 0,25 μm . La température de la ligne de transfert est de 250°C et le débit de la phase mobile (He) est de 1 ml/min. L'injection est effectuée en mode pulsed splitless.

La programmation de température du four est la suivante : un isotherme à 40°C pendant 5 min suivi d'une programmation de température à raison de 3°C par minute jusqu'à 200°C et maintenue à cette température pendant 10 minutes.

L'identification des molécules est rendue possible grâce à l'utilisation d'un chromatographe en phase gazeuse de marque Agilent 6890 N couplée à un spectromètre de masse de marque Agilent 5973 N. Ce spectromètre fonctionne en mode ionisation à impact électronique (70eV). La gamme de masse balayée est comprise entre 25 et 400 uma.

2.2.4.3. Identification et quantification

Les composés d'arôme sont identifiés par comparaison :

- de leurs spectres de masse à ceux disponibles dans des bibliothèques commerciales (NIST02, WILEY) ou constituées par nos soins.

- de leurs indices de rétention relatifs calculés à ceux disponibles dans la littérature

L'analyse semi quantitative est obtenue à partir du calcul de l'aire de chaque molécule identifiée par rapport à l'aire de l'étalon interne :

- pour la colonne apolaire, butan-1-ol de concentration 2,2 g/L

- pour la colonne polaire, trans-oct-2-éнал de concentration 55 mg/L.

2.3. Analyse aromatique de la boisson café

Un aliquot de poudre de café torréfié de chaque lot obtenu en 2.2.1. est utilisé pour l'analyse de la composition aromatique de la boisson café. La préparation des cafés boissons

sert soit, à l'analyse des composés volatils par la méthode d'extraction en phase solide (SPE), soit aux analyses sensorielles.

2.3.1. Préparation des cafés boissons pour l'analyse SPE

Une cafetière à piston de marque Bodum d'une contenance de 500 mL a été utilisée en vue de la préparation de 50 mL de café. 7 grammes de poudre de café ainsi que 50 mL d'eau faiblement minéralisée (inférieure à 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$), préalablement portée à une température de 94°C sont placés dans la cafetière. L'ensemble est fermé hermétiquement afin d'éviter des pertes d'arômes. Il est agité au départ quelques secondes puis laissé à infuser sans agitation pendant 5 minutes. Le liquide est séparé du marc à l'aide du piston. Le liquide est recueilli dans un ballon de 250 mL placé dans un bain de glace et afin d'éviter les pertes de vapeur d'arôme, une colonne à reflux alimentée par un courant d'eau froide est adaptée sur ce ballon. Ce système de réfrigération est maintenu pendant 10 minutes. Au bout des 10 minutes, 30 mL de café froid sont récupérés et filtrés sur des filtres Wathman de porosité (0,2 μm) et les composés volatils contenus uniquement dans 25 mL de ce café filtré froid sont adsorbés sur la colonne SPE.

2.3.2. Préparation des cafés boissons pour l'analyse sensorielle

Une cafetière à piston de marque Bodum d'une contenance de 1L a été utilisée en vue de la préparation de 1L de café. 70 grammes de poudre de café ainsi que 1L d'eau faiblement minéralisée (inférieure à 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$), préalablement portée à une température de 94°C sont placés dans la cafetière. L'ensemble est agité au départ quelques secondes puis laissé à infuser sans agitation pendant 5 minutes. Au bout des 5 minutes d'infusion, le liquide est séparé du marc à l'aide du piston.

2.3.3. Analyse de la fraction volatile par extraction sur phase solide

2.3.3.1. Extraction

La méthode SPE est une méthode d'extraction basée sur une adsorption sur résine suivie d'une désorption. Elle est utilisée pour adsorber les molécules d'intérêt afin de concentrer ces molécules souvent à l'état de trace.

Le conditionnement des cartouches de marque LiChrolut EN est réalisé avec 2 mL d'eau ultrapure (18,2 M $\Omega\cdot\text{cm}$ à 25°C, système Milli-Q) et 2 mL de méthanol de marque

Merck. Les cartouches sont placées ensuite sur un « vacuum manifold » de marque Echromtech. Le débit de l'élution est de 2 mL/min.

L'adsorption sur la résine des composés volatils est réalisée en versant sur la cartouche 25 mL de café boisson préparée en 2.3.1. et 1 mL de butan-1-ol, étalon interne à 2,2 g/L.

L'élution des composés d'arôme est effectuée par passage de 1 mL du mélange pentane/dichlorométhane (2 : 1) (v / v). Les solvants pentane et dichlorométhane sont de marque Merck.

La phase de lavage des cartouches est effectuée successivement avec 1 mL de méthanol puis 1 mL d'eau déionisée.

L'éluat et la fraction méthanolique sont récupérés séparément dans des vials de 10 mL et séchés au Na₂SO₄. L'éluat et la fraction méthanolique ainsi séchés sont transvasés dans des petits vials de 2 mL et sont concentrés sous atmosphère d'azote jusqu'à 0,1 mL par un système de bullage à l'azote qui permet d'éliminer l'oxygène dissous dans la solution.

2.3.3.2. Séparation, identification et quantification

1 µL de l'éluat concentré est injecté en CPG-SM sur colonne polaire et apolaire.

2.3.3.2.1. Colonne polaire

L'analyse séparative des composés d'arôme est rendue possible grâce à l'utilisation d'un chromatographe en phase gazeuse de marque HP 6890 équipé d'une colonne polaire Supelco-Wax d'une longueur de 60 m, d'un diamètre interne de 320 µm et d'une épaisseur de phase de 0,25 µm. La température de la ligne de transfert est de 250°C et le débit du gaz vecteur (He) est de 1 mL/min. L'injection est effectuée en mode pulsed splitless. La programmation de température est la suivante : isotherme à 40°C pendant 5 minutes suivi d'une programmation de température à 3°C par minute, puis d'un isotherme à 200°C pendant 10 minutes.

L'identification des molécules est réalisée grâce au couplage d'un chromatographe en phase gazeuse et d'un spectromètre de masse de marque HP 6890 qui fonctionne en mode ionisation à impact électronique (70eV). La gamme de masse balayée est comprise entre 25 et 400 uma.

2.3.3.2.2. Colonne apolaire

L'analyse séparative des composés d'arôme est réalisée par une chromatographie en phase gazeuse de marque Agilent 6890 N équipée d'une colonne apolaire SPB-5 de longueur

60 m de diamètre interne 320 μm et d'épaisseur de phase 0.25 μm . La température de la ligne de transfert est de 250°C et le débit de la phase mobile (He) est de 1 mL/min. L'injection est effectuée en mode pulsed splitless

La programmation de température est la suivante : isotherme à 40°C pendant 5 min suivi d'une programmation de température à 3°C par minute puis d'un isotherme à 200°C pendant 10 minutes.

L'identification des molécules est réalisée grâce au couplage d'un chromatographe en phase gazeuse et d'un spectromètre de masse de marque 5973 N qui fonctionne en mode ionisation à impact électronique (70eV). La gamme de masse balayée est comprise entre 25 et 400 uma.

2.3.3.3. Identification et quantification

Les composés d'arôme sont identifiés par comparaison :

- de leurs spectres de masse à ceux des bibliothèques disponibles commercialement (NIST02, WILEY) ou constitués par nos soins.
- de leurs indices de rétention relatifs calculés à ceux disponibles dans la littérature [6, 7].

L'analyse semi-quantitative est obtenue à partir du calcul de l'aire de chaque molécule identifiée par rapport à l'aire de l'étalon interne (butan-1-ol).

2.3.4. Description organoleptique par analyse sensorielle

2.3.4.1. Constitution du jury d'experts

La sélection des dégustateurs a été réalisée selon la norme homologuée AFNOR V 09-002 [5]. Le jury d'experts réunionnais a dégusté et noté les différents échantillons de café boisson. Ce jury est composé de 11 membres, 6 femmes et 5 hommes de moyenne d'âge de 45 ans.

2.3.4.2. Déroulement d'une analyse sensorielle

Une feuille de résultats est distribuée à chacun des 11 dégustateurs sur laquelle ils attribuent aux cafés des notes de 1 à 5 à 17 descripteurs d'odeur et de goût suivant deux échelles différentes.

100 mL de café, préparés en 2.3.2, sont versés dans 4 tasses randomisées destinées à chacun des panélistes.

L'évaluation sensorielle de chaque tasse de café se déroule en deux phases pendant lesquelles les experts évaluent chaque tasse suivant les 17 descripteurs organoleptiques (Tableau LIV).

Tout d'abord, chaque panéliste procède à une analyse olfactive des quatre tasses et note l'intensité aromatique et la qualité aromatique de chacune d'entre elles suivant l'échelle d'intensité 1. Ensuite, chaque panéliste évalue les quatre tasses suivant les 14 descripteurs gustatifs suivant l'échelle d'intensité 1.

A la fin des deux phases, une évaluation hédonique globale (goût et odeur) du café est demandée pour chaque dégustateur. Cette évaluation hédonique globale est la notation du descripteur « préférence » suivant l'échelle 2.

Tableau LIV
Liste des descripteurs « odeur » et « goût » et le type d'échelle de notation respective.

Descripteurs odeurs et goût	Dégustation odeur	Dégustation goût	Type d'échelle de notation
Intensité aromatique	X		1
Qualité aromatique	X		1
Corps		X	1
Acidité		X	1
Amertume		X	1
Astringence		X	1
Aigre		X	1
Fruité		X	1
Métallique		X	1
Apre		X	1
Vert		X	1
Poussiéreux		X	1
Ligneux		X	1
Brûlé		X	1
Fermenté		X	1
Persistance en bouche		X	1
Préférence	X	X	2

Le type d'échelle de notation numéro 1 qui s'applique pour tous les descripteurs, excepté pour la préférence et le type d'échelle de notation numéro 2 pour la préférence sont donnés dans le tableau LV.

Tableau LV
Les échelles de notation « 1 » et « 2 » et l'interprétation des notes respectives.

Notation échelle « 1 »	Interprétation	Notation échelle « 2 »	Interprétation
0	Nul	0	Inconsommable
1	Très faible	1	Très mauvais
2	Faible	2	Mauvais
3	Net	3	Bon
4	Fort	4	Très bon
5	Très fort	5	excellent

Le tableau LVI résume le déroulement de l'analyse sensorielle avec les deux phases. La première phase est l'appréciation olfactive des quatre tasses par chaque expert qui note immédiatement l'intensité et la qualité aromatique. La deuxième phase est l'appréciation en bouche des quatre tasses.

Afin de ne pas fausser les évaluations sensorielles entre l'évaluation de la première tasse et la quatrième, nous nous sommes assurés que chaque tasse de café est à la même température, comme nous le montre le tableau LVI.

Tableau LVI
Description des actions effectuées lors d'une analyse sensorielle en fonction du temps (min ; s) et de la température à l'intérieur de la tasse (°C).

Action effectuée	Temps écoulé depuis le début	Température à l'intérieur de la tasse °C
Presse	5m25s	80
Verse dans les 4 tasses	6m	63
1 ^{ère} dégustation ODEUR	7m50s	61
4 ^{ème} dégustation	8m50s	60
1 ^{ère} dégustation BOUCHE	9m30s	58
4 ^{ème} dégustation	11m	57

3 - Calculs statistiques et analyse de données

Les calculs statistiques et les analyses de données sont réalisés grâce aux logiciels : Microsoft Excel 2002 (Pack office XP, Microsoft Corp.) et XLSTAT-Pro Version 2007.4 (Addinsoft, France).

Références Bibliographiques

1. Martin M. J., Pablos F., Gonzalez G. Discrimination between arabica and robusta green coffee varieties according to their chemical composition. *Talanta*, **1998**, 46, 1259-1264.
2. Adriana S. F., Juliana C. F., Mendonca S., Oliveira D. Composition of green and roasted coffees of different cup qualities. *LWT*, **2005**, 38, 709–715.
3. Farah A., Monteiro M. C., Calado V., Franca A. S., L.C. Trugo L. C. Correlation between cup quality and chemical attributes of Brazilian coffee. *Food Chemistry*, **2006**, 98, 373–380.
4. Payet. B. 2006. Valorisation des produits sucriers de la Réunion, recherché de compléments alimentaires à activité antioxydante. *Thèse*. Université de la Réunion, **2006**.
5. Norme AFNOR V 09-002. *NF ISO 3972 Analyse sensorielle - Méthodologie - Méthode d'éveil à la sensibilité gustative*, **2005**.
6. Pherobase: <http://www.pherobase.com/> , Flavornet: <http://www.flavornet.org/> . Sites Internet de bases de données sur les molécules chimiques et aromatiques. Date de connexion : janvier 2011
7. Adams R. P. *Identification of essentials oil components by chromatography/ quadrupole mass spectrometry*. Ed. Allured: USA, **1995**, p 455.

Liste des Tableaux

Tableau I : Principales différences entre les variétés <i>arabica</i> et <i>robusta</i> .	17
Tableau II : Description des deux types de défauts lors d'un test visuel sur 350 grammes de café vert.	23
Tableau III : Classification commerciale, mondialement utilisée, en fonction du nombre de défauts obtenus lors du test visuel sur café vert.	24
Tableau IV : Standards de qualité retenus par la SCAA pour tous les arabicas pour l'obtention du grade « specialty coffee ».	24
Tableau V : Composition globale du café vert « Bourbon Pointu » (récoltes 2006 et 2007).	42
Tableau VI : Composition moyenne du café vert « Bourbon Pointu », en % MS pour les deux années de récolte.	46
Tableau VII : Contribution des différentes variables aux deux composantes F1 et F2 de l'AFD réalisée sur les échantillons de café vert « Bourbon Pointu ».	55
Tableau VIII : Différences significatives des teneurs en caféine, C18: 1 n-9, C16: 0, C20: 0 et trigonelline au seuil de risque 5% entre les trois classes d'altitude et entre la zone N et les zones C et S.	56
Tableau IX : Moyenne des notes des analyses sensorielles des cafés issus des 4 profils de torréfaction.	62
Tableau X : Différences significatives des moyennes des notes des descripteurs sensoriels au seuil de risque 5% entre les quatre profils de torréfaction.	62
Tableau XI : Valeurs propres de l'AFD réalisée sur les échantillons de café torréfié « Bourbon pointu » issus des 4 profils de torréfaction.	63
Tableau XII : Contribution des différentes variables aux deux composantes F1 et F2 de l'AFD réalisée sur les échantillons de café torréfié « Bourbon Pointu » issus des quatre profils de torréfaction.	64
Tableau XIII : Liste des molécules identifiées dans le café torréfié en poudre, sur colonne polaire et apolaire pour les deux années de récolte avec les indices de rétention relatifs calculés et théoriques respectifs.	68
Tableau XIV : Liste des composés aromatiques identifiés dans le café torréfié en poudre, sur la colonne polaire pour les deux années de récoltes avec leur teneur exprimée en ppm.	71
Tableau XV : Contribution des différentes variables aux composantes F1 et F2 de l'AFD réalisée sur les échantillons de café torréfié en poudre « Bourbon Pointu ».	75
Tableau XVI : Contribution des différentes variables aux composantes F1 et F2 de l'AFD (no.2) réalisée sur les échantillons de café torréfié en poudre « Bourbon Pointu ».	77
Tableau XVII : Caractéristiques des quatre transformations post-récolte.	78
Tableau XVIII : Rôle des composés non volatils du café boisson.	80
Tableau XIX : Liste des molécules identifiées dans la boisson café, sur colonne polaire et apolaire pour les deux années de récolte avec les indices de rétention relatifs calculés et de référence respectifs.	81
Tableau XX : Liste des composés aromatiques identifiés dans la boisson café, sur la colonne polaire pour les deux années de récoltes avec leur teneur exprimée en mg/L.	84
Tableau XXI : Contribution des différentes variables aux composantes F1 et F2 de l'AFD réalisée sur les échantillons de café boisson « Bourbon Pointu ».	87

Tableau XXII : Moyennes des concentrations des 29 molécules identifiées à la fois dans les poudres et les cafés boissons des années 2006 et 2007 selon le type de transformation post-récolte.	90
Tableau XXIII : Matrice de corrélation de l'AFD (no.2) des échantillons de café boisson « Bourbon pointu ».	94
Tableau XXIV : Critères de classification du café « Bourbon Pointu ».	104
Tableau XXV : Moyenne des notes des descripteurs pour les catégories commerciales et non commerciale de café.	106
Tableau XXVI : Différences significatives des notes des descripteurs au seuil de 5% entre les trois catégories commerciales et la catégorie non commerciale.	106
Tableau XXVII : Répartition des 216 échantillons dans les catégories commerciales et non commerciale.	107
Tableau XXVIII : Répartition des cafés étudiés et de leurs paramètres pédoclimatiques par catégorie commerciale.	108
Tableau XXIX : Paramètres pédoclimatiques et types de transformations subies des cafés étudiés.	109
Tableau XXX : Moyenne des concentrations des composés biochimiques en % de matière sèche pour les trois catégories commerciales et la non commerciale.	110
Tableau XXXI : Contribution des différentes variables aux composantes F1 et F2 de l'AFD réalisée sur nos échantillons de café « Bourbon Pointu » classés dans leur catégorie respective	112
Tableau XXXII : Liste des composés retenus pour les 186 échantillons de café analysés et leurs cosinus carrés suivant les axes F1 et F2.	115
Tableau XXXIII : Fréquence (unité) et valeur-test des 4 modalités (Zone, Altitude, Transformation et Catégorie) des regroupements de tous les échantillons dans leur classe respective	118
Tableau XXXIV : Valeurs des cosinus carrés des composés biochimiques suivant les axes F1 et F2	119
Tableau XXXV : Liste des 22 composés responsables de l'arôme de café avec leur teneur exprimée en µg/L et leur valeur OAV respective dans les Arabicas et les Robustas.	122
Tableau XXXVI : Concentration en mg/L des composés communs entre l'identification de la fraction aromatique du café « Bourbon Pointu » et la liste de Semmelroch, Grosch (1996) [19].	123
Tableau XXXVII : Moyennes des concentrations des composés aromatiques (mg/L) par catégorie commerciale, seuil olfactif (ppm), OAV et odeur respectifs.	124
Tableau XXXVIII : Liste des composés aromatiques les plus odorants dans la boisson café « Bourbon Pointu », avec leur teneur exprimée en mg/L et leur seuil olfactif (ppm), OAV et odeur respectifs.	129
Tableau XXXIX : Liste des composés aromatiques communs aux cafés boisson « Bourbon Pointu » des trois catégories commerciales, avec leur teneur exprimée en mg/L, leur OAV, odeur et seuil olfactif respectifs.	131
Tableau XL : Profil sensoriel commun aux cafés boisson des trois catégories commerciales « Bourbon Pointu » représenté par la somme des valeurs OAV et le logarithme de la somme des valeurs OAV pour chaque type d'odeur.	132
Tableau XLI : Liste des composés aromatiques non communs entre les cafés boisson des trois catégories commerciales avec leur valeur OAV et odeur respectives.	133
Tableau XLII : Liste des composés aromatiques spécifiques aux cafés boisson de chaque catégorie commerciale avec leur valeur OAV et odeur respectives.	134
Tableau XLIII : Part en pourcentage des principaux composés aromatiques issus de la trigonelline.	139
Tableau XLIV : Concentration en mg/L des composés aromatiques et teneur en % de matière sèche des composés biochimiques des regroupements de cafés sous leur forme de regroupement respectif.	143
Tableau XLV : Contribution des différentes variables aux composantes F1 et F2 de l'AFD réalisée sur les 186 échantillons de café boisson « Bourbon pointu ».	145

Tableau XLVI : Caractéristique des regroupements en terme de modalités pédoclimatiques (type de transformations post-récolte et classe d'altitude).	148
Tableau XLVII : Identification des cafés avec le numéro de caféière : classe d'altitude, type de sol et traitement post-récolte.	169
Tableau XLVIII : Différentes phases des transformations post-récoltes, fermentation (sans eau), macération et trempage (changement d'eau) exprimées en cumul degré Celsius/heure.	170
Tableau XLIX : Gradient de concentration des éluants A et B utilisé pour l'analyse de la caféine et de la trigonelline.	171
Tableau L : Concentration des trois solutions témoins à partir d'une solution mère à 10 mM.	171
Tableau LI : Gradient de concentration des éluants A et B utilisé pour l'analyse des isomères de l'acide chlorogénique.	172
Tableau LII : Préparation de la solution témoin utilisée pour l'analyse du saccharose, du glucose et du fructose.	174
Tableau LIII : Solution témoin d'acides gras utilisée pour l'analyse des acides gras.	174
Tableau LIV : Liste des descripteurs « odeur » et « goût » et le type d'échelle de notation respective.	183
Tableau LV : Les échelles de notation « 1 » et « 2 » et l'interprétation des notes respectives.	183
Tableau LVI : Description des actions effectuées lors d'une analyse sensorielle en fonction du temps (min ; s) et de la température à l'intérieur de la tasse (°C).	184

Listes Figures

Figure 1 : Représentation des différentes parties en coupe d'une cerise de café.	16
Figure 2 : Répartition mondiale de la production du café.	18
Figure 3 : Origine du café Bourbon Pointu [25].	28
Figure 4 : Différences morphologique des différentes parties des deux variétés d'Arabica Bourbon (Parent et mutant) [25].	29
Figure 5 : Terroirs du « Bourbon Pointu ».	31
Figure 6 : Composés biochimiques identifiés et quantifiés dans le café vert « Bourbon Pointu ».	41
Figure 7 : Variations en pourcentage de la teneur des acides gras, de la somme des acides gras, du saccharose, de la trigonelline et de la somme des acides chlorogéniques entre les deux années de récolte 2006 et 2007 pour les trois zones de productions C (Centre), N (Nord), S (Sud).	48
Figure 8 : Variations en pourcentage de la teneur des isomères de l'acide chlorogénique entre les deux années de récolte 2006 et 2007 pour les trois zones de productions C (Centre), N (Nord), S (Sud).	48
Figure 9 : Variations en pourcentage de la teneur des acides gras, de la somme des acides gras, du saccharose, de la trigonelline et de la somme des acides chlorogéniques entre les deux années de récolte 2006 et 2007 pour les trois classes d'altitude, 1 (<1000m), 2 (<850m), 3 (<650m).	50
Figure 10 : Variations en pourcentage de la teneur des isomères de l'acide chlorogénique entre les deux années de récolte 2006 et 2007 pour les trois classes d'altitude, 1 (<1000m), 2 (<850m), 3 (<650m).	50
Figure 11 : Variations en pourcentage de la teneur des acides gras, de la somme des acides gras, du saccharose, de la trigonelline et de la somme des acides chlorogéniques entre les deux années de récolte 2006 et 2007 pour les quatre variantes du traitement post-récolte par voie humide, A, C, E, G.	52
Figure 12 : Variations en pourcentage de la teneur des isomères de l'acide chlorogénique entre les deux années de récolte 2006 et 2007 pour les quatre variantes du traitement post-récolte par voie humide, A, C, E, G.	52
Figure 14: Evolution de la température de l'air et du grain (degrés Celsius) dans le torréfacteur et du taux d'humidité du grain (pourcentage) en fonction de la durée de la torréfaction (secondes).	59
Figure 15 : Représentation des quatre profils de torréfaction 1, 1+, 2 et 2+ en fonction du couple Température (°C) ; Temps (s).	61
Figure 16: Représentation graphique de l'analyse factorielle discriminante sur les échantillons de café torréfié « Bourbon Pointu » issus des 4 profils de torréfaction.	65
Figure 17: Représentation graphique de l'analyse factorielle discriminante sur les échantillons de café torréfiés en poudre « Bourbon Pointu ».	76
Figure 18: Représentation graphique de l'analyse factorielle discriminante (no.2) sur les échantillons de café torréfié en poudre « Bourbon Pointu ».	79
Figure 19 : Représentation graphique de l'analyse factorielle discriminante sur les échantillons de café boisson « Bourbon Pointu ».	88
Figure 20 : Représentation graphique de l'analyse factorielle discriminante sur les échantillons de café boisson « Bourbon Pointu ».	92
Figure 21 : Profils sensoriels des catégories commerciales et non commerciale de café (notes comprises entre 0 et 5).	109
Figure 22 : Représentation graphique de l'analyse factorielle discriminante sur les échantillons du café « Bourbon Pointu ».	113

Figure 23 : Dendrogramme de la classification ascendante hiérarchique des échantillons résultant de l'ACP.	116
Figure 24 : Analyse en composantes principales des 186 échantillons suivant le numéro de leur classe, en fonction de la teneur des composés biochimiques retenus.	120
Figure 25 : Proportion en % de chaque type d'odeur dans le profil sensoriel du café boisson « Bourbon Pointu ».	132
Figure 26 : Schéma simplifié de la réaction de Maillard.	137
Figure 27 : schéma simplifié de la dégradation des lipides.	138
Figure 28 : Schéma simplifié de la formation de composés aromatiques issus de la trigonelline	139
Figure 29 : Schéma simplifié de la dégradation de l'acide chlorogénique	141
Figure 30 : Représentation graphique de l'analyse factorielle discriminante sur les échantillons du café « Bourbon Pointu ».	146
Figure 31 : Formation de composés aromatiques issus de la dégradation des hydroperoxydes	149
Figure 32 : Formation du 2-méthylbutanal et du 3-méthylbutanal respectivement à partir de l'isoleucine et de la leucine.	150
Figure 33 : Mécanisme simplifié de formation des monoterpènes à partir du diphosphate de géranyle	151
Figure 34 : Schéma simplifié de la formation des composés phénoliques et benzéniques à partir de l'acide chlorogénique.	153
Figure 35 : Formation des pyrazines lors de la dégradation de Strecker	154
Figure 36 : Cartographie des caféiculteurs et des trois zones géographiques d'échantillonnage sur l'île de La Réunion	168



Résumé

Cette thèse est consacrée à l'étude du café « Bourbon Pointu », *Coffea arabica* var. *laurina*, né d'une mutation spontanée de la variété Bourbon à l'île de La Réunion.

Les teneurs moyennes des composés majoritaires non volatils du café vert sont (pourcentage de matière sèche) les suivantes : saccharose (7,1), trigonelline (1,3), caféine (0,75), acide caféoyl-5-quinique (4,7), acide palmitique (5,0), acide linoléique (6,5).

L'analyse sensorielle a permis de mettre au point un profil de torréfaction original de courte durée. Parmi les 145 composés volatils extraits des poudres de café torréfié par SPME, cinq sont majoritaires (teneurs moyennes en ppm): acide acétique (34), 2-furanéméthanol (117), 5-méthyl-2-furfural (166), furfural (144), 2-méthylpyrazine (47). Ces cinq composés volatils extraits par SPE se retrouvent dans le café en tasse : acide acétique (23), 2-furanéméthanol (405), 5-méthyl-2-furfural (36), furfural (85), 2-méthylpyrazine (73) avec en plus, la γ -butyrolactone (97).

Le ratio entre la concentration de la molécule et son seuil de perception définit l'Odor Activity Value (OAV). La conversion des concentrations des composés volatils en unités OAV a permis de dégager neuf molécules ayant un impact olfactif important : 2-furfurylthiol (café torréfié), 2-méthylpropanal (chocolat), dodécanal (agrumes), 2-éthylhexan-1-ol (agrumes), β -pinène (boisé, agrumes), furfural (boisé, caramel), 2-hydroxy-3-méthylcyclopent-2-én-1-one (érable), hex-2-énal (pomme verte), 2-méthylbut-2-énal (fruité, vert).

La détermination de ces OAV a permis de différencier les trois catégories commerciales au niveau olfactif avec la prédominance d'aldéhydes pour les « Grand cru », le phénylacétaldéhyde pour les « Sublime », et les pyrazines pour les « Authentique ».

Les conditions géoclimatiques et les transformations post-récoltes influencent de façon non négligeable la composition chimique du café vert et donc les arômes générés lors de la torréfaction et en conséquence, la répartition des cafés dans les trois catégories.

L'ensemble de ces résultats fait du « Bourbon Pointu », un café haut de gamme classé parmi les « cafés gourmets ».

Mots clés : *Coffea arabica*, Bourbon Pointu, café vert, café torréfié, conditions géoclimatiques, café boisson, OAV, café gourmet.

Abstract

This thesis is devoted to the study of "Bourbon Pointu" coffee, *Coffea arabica* var. *laurina*, born from a spontaneous mutation of the Bourbon variety in Reunion Island.

The mean contents of non-volatile main compounds of green coffee are (percentage of dry matter): sucrose (7.1), trigonellin (1.3), caffeine (0.75), cafeoyl-5-quinic acid (1.7), palmitic acid (5.0), linoleic acid (6.5).

Sensory analysis allowed to develop an original short time roasting profile. Among the 145 volatile compounds extracted from roasted coffee powders by SPME, the mean contents of the five major components (ppm) are: acetic acid (34), 2-furanmethanol (117), 5-methyl-2-furfural (166), furfural (144), 2-methylpyrazine (47). These five volatile compounds extracted by SPE are found in the brew coffee: acetic acid (23), 2-furanmethanol (405), 5-methyl-2-furfural (36), furfural (85), 2-methylpyrazine (73) plus γ -butyrolactone (97).

The ratio of molecule content to its perception threshold defines the "Odor Activity Value" (OAV). The conversion of the contents of volatile compounds in units OAV emphasized nine molecules with an important olfactory impact: 2-furfurylthiol (roasted coffee), 2-methylpropanal (chocolate), dodecanal (citrus), 2-ethylhexan-1-ol (citrus), β -pinene (woody, citrus), furfural (woody, caramel), 2-hydroxy-3-methylcyclopent-2-en-1-one (maple), hex-2-enal (green apple), 2-methylbut-2-enal (fruity, green).

The determination of these OAV differentiated the three commercial categories related to their typical odor due to the predominance of aldehydes for the "Grand cru", phenylacetaldehyde for "Sublime" and pyrazines for "Authentic".

Geoclimatic conditions and post-harvest processing have a significant influence on the green coffee composition, on the flavors generated during roasting and thus, on the coffee distribution in the three categories.

All these results define the "Bourbon Pointu" as a premium coffee and classify it as a "specialty coffee."

Key words : *Coffea arabica*, Bourbon Pointu, green coffee, roasted coffee, geoclimatic conditions, brew coffee, OAV, specialty coffee.